

Descorrelacionador Aliado à Diversidade de Percursos

Elvis Miguel Galeas Stancanelli, Taufik Abrão e Paul Jean Etienne Jeszensky

Resumo—Um sistema DS-CDMA unicelular e assíncrono é modelado considerando um canal de rádio móvel multipercursos lento e seletivo em frequência. O desempenho do sistema é avaliado em termos de taxa de erro de bit analisando-se os benefícios provenientes da implementação descorrelacionadora e da diversidade de percursos. Por fim, constatou-se a superioridade de desempenho na condição em que os números de ramos e de percursos são idênticos.

Palavras-Chave—DS-CDMA, descorrelacionador, desvanecimentos multipercursos, receptor *Rake*.

Abstract—An asynchronous unicellular DS-CDMA system is modeled considering a slow fading frequency selective multipath mobile radio channel. The system performance is evaluated in bit error rate terms analyzing the benefits that derive from decorrelator implementation and path diversity. Finally we have verified the performance superiority for identical fingers and paths numbers condition.

Keywords—DS-CDMA, decorrelator, multipath fading, *Rake* receiver.

I. INTRODUÇÃO

CDMA (do inglês, *Code Division Multiple Access*) [1] é um esquema de múltiplo acesso baseado no espalhamento espectral [2], através do qual se permite que todos usuários transmitam simultaneamente e ocupem a mesma banda de frequência, não havendo recursos exclusivos a um único usuário, sejam temporais ou de frequência portadora. Isso livra o CDMA de limitações semelhantes às do TDMA e do FDMA [3]. Todavia, a capacidade do sistema tem como principal limitante a MAI¹ (do inglês, *Multiple Access Interference*).

Na telefonia móvel celular, a influência do canal é grande, podendo ser observada por fortes distorções² no sinal recebido. A deterioração da informação é devida ao fácil surgimento de fenômenos de sobreamento, reflexão e, por conseguinte, à criação de diversos percursos entre as antenas de transmissão e recepção. Aliada a tais fatores, a própria mobilidade do canal torna crítica a manifestação de desvanecimentos no sinal. Fortuitamente, as atenuações no sinal chegam em níveis críticos, podendo comprometer a confiabilidade do sistema.

Elvis Miguel Galeas Stancanelli e Paul Jean Etienne Jeszensky estão com o Laboratório de Comunicações e Sinais, Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. e-mails: {emiguel,pjj}@lcs.poli.usp.br

Taufik Abrão está com o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Brasil. e-mail: taufik@uel.br
Este trabalho contou com o apoio da FDTE e da CAPES.

¹MAI, trata-se da interferência gerada pelos demais usuários.

²Neste texto, a palavra *distorção* denota a modificação na amplitude e na fase do sinal transmitido provocada pelo canal, independentemente das frequências componentes do sinal.

Existem soluções particulares para o combate de ambos os fatores degradadores de sistemas móveis CDMA: para o combate à MAI faz-se uso de detecção multiusuário, tal como o descorrelacionador, o MMSE e canceladores de interferência; já no combate aos desvanecimentos de canal, a implementação de técnicas de diversidade mostra-se mais apropriada.

Neste artigo, faz-se uma análise do desempenho de um detector descorrelacionador provido de diversidade de percursos aplicável a um sistema de comunicação móvel DS-CDMA (do inglês, *Direct Sequence - Code Division Multiple Access*). Na seção II faz-se um breve estudo dos canais de rádio móveis, salientando seu efeito sobre um sinal DS-CDMA típico. Uma apresentação da técnicas de recepção multipercursos descorrelacionadora é feita na seção III, e, na seção IV, alguns resultados obtidos através de simulação computacional são apresentados e discutidos. As considerações finais pertinentes ao contexto abordado são feitas na seção V.

II. CANAIS DE RÁDIO MÓVEIS

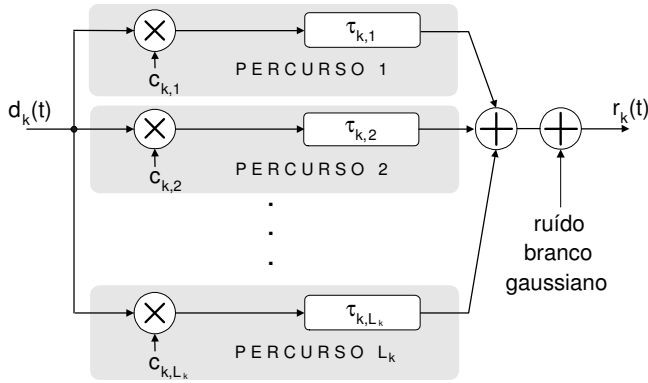
A composição gasosa do canal de rádio em um sistema móvel celular interage com o sinal transmitido, atenuando e defasando-o ao longo do percurso entre transmissor e receptor. Interações das ondas de rádio com superfícies presentes no canal incitam fenômenos como reflexão, difração e dispersão. Associando a variação do índice de refração do ar à mobilidade do canal, criam e extinguem-se dinamicamente vários percursos de comunicação, cada um dos quais possuindo atraso de propagação, τ , e coeficiente complexo de distorção (compreendendo atenuação e defasagem), c , particulares.

A resposta impulsiva do canal móvel é variante no tempo, descrevendo desvanecimentos no sinal transmitido como resultado da soma das respostas de todos percursos. Para cada tipo de ambiente, o canal terá características muito particulares.

Atualmente, a literatura compreende algumas publicações clássicas sobre caracterização de canais móveis [4], [5], [6]. Comumente, associa-se a um determinado canal uma função densidade de probabilidade [7], sendo a *Rice* e a *Rayleigh* as mais utilizadas para a modelagem de desvanecimentos de multipercursos, conforme a existência ou não de linha de visada na comunicação, respectivamente; e, para os deslocamentos de fase e atrasos, admite-se uma distribuição uniforme.

Na Figura 1 é apresentado o modelo de canal adotado neste artigo. Um fato implícito no modelo é que os percursos de propagação são gerados e extintos dinamicamente.

Geralmente, a classificação do canal de rádio móvel toma como base duas manifestações de pequena escala [5]: espalhamento e variação temporais. Conforme o espalhamento

Fig. 1. Modelo para canal multipercursos para o k -ésimo usuário.

temporal seja grande ou pequeno, o canal pode ser classificado em seletivo ou não-seletivo em frequência, respectivamente. Por outro lado, tomando-se como base o período de símbolo transmitido, os desvanecimentos do canal são classificados em rápidos ou lentos, segundo sua taxa.

O sinal banda-base que chega ao receptor, $r(t)$, pode ser matematicamente escrito como:

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{\ell=1}^{L_k} c_{k,\ell}(t) d_k[t - \tau_{k,\ell}(t)] + n(t), \quad (1)$$

onde K é o número de usuários; L_k , o número de percursos existentes no canal para o k -ésimo usuário; $c_{k,\ell}(t)$ denota os coeficientes complexos que modelam a atenuação e deslocamento de fase sofridos pelo sinal do k -ésimo usuário em seu ℓ -ésimo percurso; $\tau_{k,\ell}(t)$ o atraso na propagação do sinal recebido pelo k -ésimo usuário através de seu ℓ -ésimo percurso; $d_k(t)$ é o sinal banda-base transmitido pelo k -ésimo usuário; $n(t)$ é o ruído branco aditivo Gaussiano, AWGN (do inglês, *Additive White Gaussian Noise*), caracterizado por distribuição estatística normal de média nula, sendo $N_o/2$ sua densidade espectral de potência bilateral.

Conforme expressão (1), junto a uma certa informação de interesse estarão adicionados não apenas réplicas atrasadas da mesma informação como também sinais de usuários interferentes e ruído de fundo. Assim como a correlação cruzada define a interferência entre os usuários, a auto-correlação fora de fase determinará as interferências entre réplicas de uma mesma informação - a *auto-interferência*.

III. ESTRUTURAS RECEPTORAS

Nas estruturas receptoras unipercursos *convencionais*, a cada usuário é disponibilizado um correlacionador com uma cópia sincronizada da assinatura deste. O sinal do usuário é então recuperado no detector correspondente através do cômputo da correlação entre o sinal recebido e a cópia de sua assinatura. A detecção para canais com AWGN é dada por

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{b} + \eta,$$

onde \mathbf{H} é a matriz de correlações cruzadas; \mathbf{A} é a matriz diagonal com as amplitudes; \mathbf{b} representa os bits transmitidos; η é o ruído filtrado e espalhado às saídas dos correlacionadores;

admite-se que as seqüências de código, tanto as empregadas na transmissão quanto na detecção, possuem energia unitária. \mathbf{H} pode ser expressa como:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}[0] & \mathbf{R}^H[1] & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{R}[1] & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \mathbf{R}^H[1] \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{R}[1] & \mathbf{R}[0] \end{pmatrix}, \quad (2)$$

onde $\mathbf{R}[m]$ é a matriz de correlações parciais com deslocamento de m bits; o sobrescrito H denota *transposição hermitiana*.

Devido aos valores não nulos de correlação cruzada das famílias de seqüência usuais, junto a uma certa informação desejada são recebidas as informações de todos os interferentes. A correlação cruzada das seqüências ativas juntamente com a disparidade de potências quantifica a interferência de múltiplo acesso entre os usuários - a MAI.

A estrutura unipercursos convencional é considerada ótima para sistemas de simples acesso diante de canal apenas com AWGN [3]. No esquema de detecção convencional, a MAI exerce grande influência no desempenho, sendo que um aumento na potência de um dos usuários é capaz de comprometer a detecção para todos os demais. De fato, nas estruturas convencionais, os demais usuários não são levados em conta na detecção do usuário de interesse. Já os detectores *multiusuários* [8] são estruturas que usufruem do conhecimento de todas as assinaturas, e, portanto, também da MAI. Em lugar de uma estimativa única, nos esquemas multiusuários os sinais são detectados levando-se em conta o conjunto de todos usuários.

As estruturas detectoras lineares multiusuários baseiam-se em um banco de filtros correlacionadores associado a uma matriz de transformação linear, \mathbf{T} (Figura 2). Uma estrutura unipercursos linear multiusuário bastante divulgada na literatura é a *descorrelacionadora*. Na condição de assincronismo entre usuários, o cálculo da matriz de transformação descorrelacionadora deve levar em conta a influência entre bits de informações adjacentes, assim [8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{descorrel} &= \mathbf{H}^+ \\ &= [\mathbf{R}^H[1]z + \mathbf{R}[0] + \mathbf{R}[1]z^{-1}]^+, \end{aligned} \quad (3)$$

onde o sobrescrito $+$ denota a inversa generalizada de *Moore-Penrose* [9].

A variável de detecção pode ser escrita como:

$$\mathbf{z}_{descorrel} = \mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{H}^+\eta. \quad (4)$$

Pode-se notar que o descorrelacionador elimina por completo a MAI. Em contrapartida, o descorrelacionador aumenta a variância da componente ruído, $\mathbf{H}^+\eta$ [8].

A expressão (3) exige o processamento de toda a mensagem a cada instante de avaliação da saída do detector. Além do mais, as matrizes de correlações parciais devem ser recalculadas sempre que ocorrer ativação ou desativação de usuários, ou mesmo quando houver mudança no atraso de qualquer usuário. Um método alternativo - mais simples - consiste em truncar

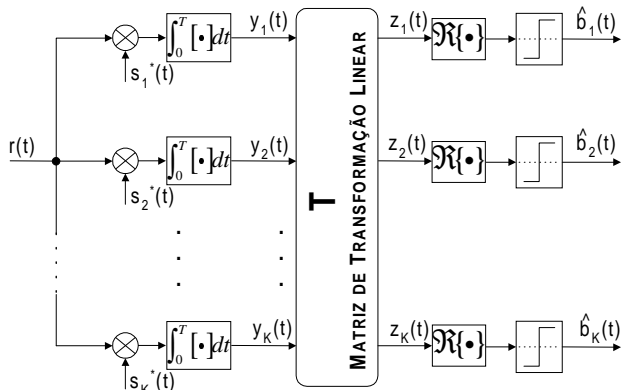


Fig. 2. Esquema de detecção multiusuário linear CDMA.

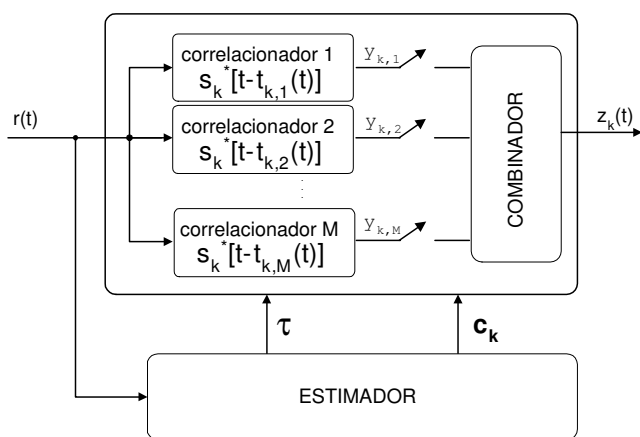


Fig. 3. Configuração básica do Rake para o k-ésimo usuário.

a janela de observação do filtro, entretanto, o desempenho do detector decresce junto à redução dessa janela [10], [11].

Detecção multiusuário aliada à diversidade de percursos

Definitivamente, os receptores unipercursos não são apropriados diante de canais de rádio móveis CDMA, em que cada percurso possui características físicas particulares e, portanto, uma resposta própria: cada um resulta em uma réplica do sinal transmitido, com atenuação e atraso próprios.

Caso sejam implementados correlacionadores acompanhando no tempo cada uma das réplicas, e capazes de fazê-lo dinamicamente, alcançar-se-á apreciável ganho de desempenho na detecção. Para tanto, faz-se necessário estimar os atrasos de todas réplicas a serem aproveitadas. Essa exploração eficiente da multiplicidade de percursos do canal é denominada *diversidade de percursos*.

Estruturas conhecidas como *Rake* [12] são projetadas justamente para combinarem os sinais recebidos através dos diversos percursos, implementando correlacionadores em janelas de intervalo de símbolo, T_b , denominados *ramos*, posicionadas nos instantes correspondentes aos atrasos de cada um dos percursos julgados significativos (Figura 3).

Idealmente, para cada percurso deve-se dispor de um ramo. No entanto, canais móveis CDMA reais são compos-

tos por inúmeros percursos. Porém, em grande parte das implementações comerciais do padrão IS-95, o número de ramos está compreendido entre 3 e 5 [13].

Receptores *Rake* são ótimos para canais multipercursos seletivos em frequência, no entanto, somente quando estiver presente um único usuário no sistema. Sua estrutura é tipicamente convencional, portanto, seu desempenho é fortemente degradado pela MAI.

A forma com que as saídas $y_{k,i}$ dos correlacionadores serão combinadas para constituir a saída do *Rake*, é estabelecida no bloco COMBINADOR da Figura 3. Apenas dois tipos de combinadores foram analisados neste artigo: EGC (do inglês, *Equal Gain Combining*) e MRC (do inglês, *Maximal Ratio Combining*).

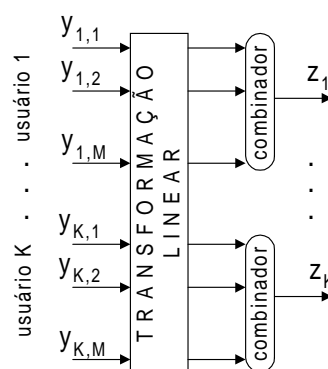


Fig. 4. Topologia básica para detecção MD.

O EGC consiste simplesmente na soma de todas as saídas $y_{k,i}$ dos correlacionadores. No MRC, a saída do detector é dada pela soma de todas as saídas dos correlacionadores atribuindo peso próprio a cada uma; esses pesos são os valores absolutos dos coeficientes de canal naquele instante. Portanto, o MRC exige estimativas da potência de cada percurso, atualizadas a cada bit. Um importante estudo sobre algumas técnicas de combinação é apresentado por Eng et al. em [14].

No *Rake* com detecção coerente são necessárias estimativas de atraso e deslocamento de fase para cada um dos percursos. No bloco ESTIMADOR da Figura 3 são geradas tais estimativas. O conhecimento dos atrasos e fases é fundamental para que os ramos estejam adequadamente sincronizados com as respectivas réplicas e para a recuperação da fase inicial destas.

Uma estrutura multipercursos descorrelacionadora pode ser obtida simplesmente associando-se ao *Rake* a matriz de transformação descorrelacionadora [15]. Uma das formas de obtê-la consiste em um banco de correlacionadores seguido por uma transformação linear, Figura 4. Trata-se, desta maneira, usuários e percursos independentemente, desacoplando-os antes de realizar a combinação de percursos para cada usuário. Essa estrutura chama-se Multipercursos-Descorrelacionadora, ou simplesmente MD.

IV. SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentados resultados de simulação, através do método Monte Carlo, de um sistema DS-CDMA assíncrono, com uma única célula, modulação BPSK e

formatação de pulso retangular. O sistema é composto basicamente por transmissão, canal de rádio móvel e recepção, não sendo implementado qualquer tipo de codificação para detectar ou corrigir erros.

Todas as situações simuladas são pertinentes ao canal de tráfego reverso, sendo que todos usuários transmitem a taxas idênticas: $R_b = 9600bps$. A análise de desempenho da detecção restringiu-se às estruturas baseadas no *Rake* e no MD com janela de observação de $16bits$.

O canal empregado é *Rayleigh* multipercursos seletivo em frequência [3], [5]. A frequência de portadora, f_c , é de $1GHz$ e a velocidade do móvel, $v = 70 km/h$, implicando em deslocamento *Doppler* normalizado de $d_{Dpl} = f_m T_b = 0,0068$; entretanto, impôs-se a constância dos coeficientes de canal no intervalo de bit.

Adotou-se como padrão um perfil de canal cujas energias seguem uma expressão exponencial e atrasos consecutivos múltiplos inteiros de T_c ,

$$\mathbb{E}[\alpha_\ell^2] = \frac{\vartheta(\ell)}{\sum \vartheta}, \quad \ell = 1, 2, \dots, L, \quad (5)$$

sendo $L = L_u$, para $u = 1, 2, \dots, K$; com máximo atraso de percurso $\tau_m = 5\mu s$; $\vartheta(\ell) = e^{-\ell \frac{\tau_c}{\tau_m}}$.

Admite-se que todas estimativas necessárias à recepção são perfeitamente conhecidas. Assim, para cada percurso do sinal a ser tratado, é posicionado com exatidão um, e apenas um, ramo. Para um número insuficiente de ramos considera-se que estes estejam corretamente posicionados visando a detecção dos primeiros percursos de maior energia. Quando o número de ramos exceder o número de percursos, sincronizam-se todos os ramos remanescentes em um mesmo percurso onde não há qualquer informação útil.

Resultados

Na Figura 5 apresenta-se o desempenho médio para 5 usuários em função da relação sinal-ruído, E_b/N_o , dos receptores *Rake* e MD com combinador MRC. A família de seqüências *Kasami Small* de comprimento $N = 63$ foi escolhida e admite-se um controle perfeito das potências. São avaliados os desempenhos diante de dois diferentes números de percursos, $L = 1$ e $L = 2$, idênticos aos números de ramos disponíveis nos receptores, $M = L$. Notar que *Rake* e MD com um único ramo correspondem, respectivamente, aos receptores unipercursos convencional e descorrelacionador.

O desempenho para qualquer dos receptores com 2 ramos supera aquele com apenas 1. De uma maneira geral, o receptor MD apresentou desempenho superior ao do *Rake*. Os desempenhos do MD podem ser melhorados ainda mais com o aumento da janela de observação, no entanto, isto traz um aumento na complexidade de implementação. Devido à redução do efeito do ruído de fundo, a superioridade do MD torna-se mais evidente para valores de E_b/N_o acima de $20dB$, sendo que acima de $22dB$ o *Rake* com 2 ramos é superado até mesmo pelo descorrelacionador.

As figuras 6 e 7 apresentam os desempenhos médios para 5 usuários em função do número de percursos resolvíveis do canal, considerando receptores *Rake* e MD com 1, 2 ou 3

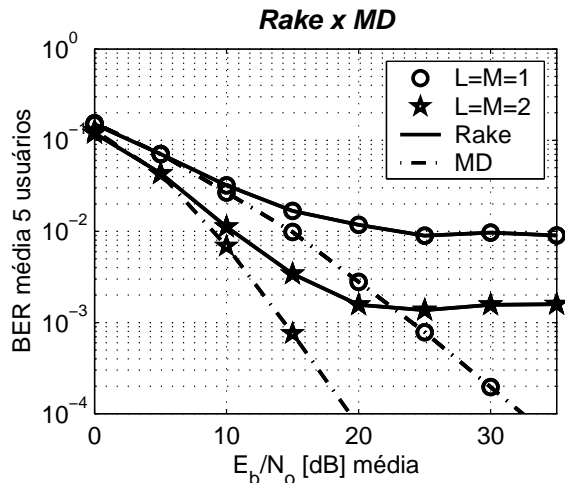


Fig. 5. Desempenho para o *Rake* e o MD, em função da relação E_b/N_o , considerando um canal *Rayleigh* multipercursos com perfil exponencial de energias.

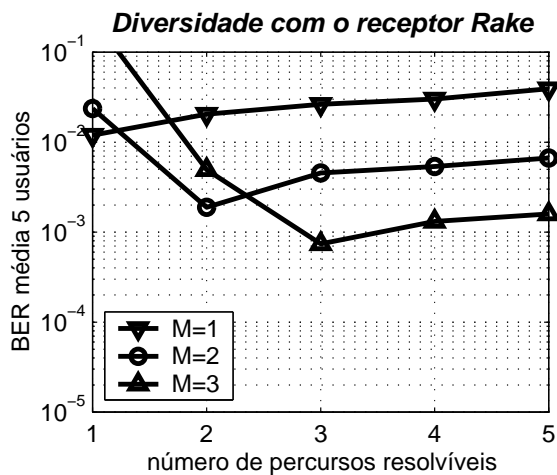
ramos, e fixando-se $E_b/N_o = 20dB$. Considera-se tanto o combinador EGC [figuras 6(a) e 6(b)] quanto o MRC [figuras 7(a) e 7(b)].

Nas figuras 6(a) e 6(b), verifica-se a degradação dos desempenhos dos receptores unipercursos – convencional e descorrelacionador –, conforme aumenta-se o número de percursos no canal. Esta degradação é devida ao fato de as réplicas da informação não serem aproveitadas, contribuindo unicamente para a geração de auto-interferência.

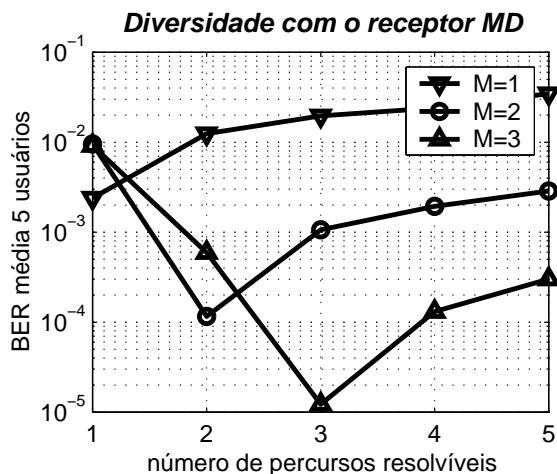
Implementando-se uma estrutura multipercursos – *Rake* ou MD –, réplicas da informação também serão captadas, ativando assim as vantagens da diversidade de percursos. Aumentando-se o número de ramos melhora-se o desempenho, visto que é reduzido o número de réplicas que contribuem exclusivamente com interferência e aumentada a quantidade de réplicas aproveitadas na detecção. Pelas figuras 6(a) e 6(b) observa-se que o ponto ótimo para o desempenho de um receptor multipercursos com um número M de ramos se dá justamente quando este número é idêntico ao número de percursos, $L = M$. Nesta condição, disponibiliza-se um, e somente um, ramo para cada percurso resolvível do canal, podendo o *Rake* e o MD serem denominados *Rake* completo e MD completo, respectivamente.

Para $M > L$, têm-se ramos excedentes. Nas simulações realizadas, os ramos excedentes foram todos sincronizados a um mesmo percurso fictício, em $\tau_{exc} > \tau_m$, onde hipoteticamente não há qualquer informação útil. Dessa maneira, tais ramos captarão apenas ruído e interferência. Além disto, para o cálculo da matriz de transformação linear do MD, \hat{H}^+ , serão utilizadas as mesmas estimativas empregadas nos ramos. Nessa situação, a matriz de correlações que descreve as informações espalhadas, H , não será exatamente a inversa da matriz de transformação linear do sinal recebido, não promovendo o adequado cancelamento dos usuários e percursos interferentes. Assim, quão maior o número de ramos excedentes pior o desempenho.

Para $M < L$, os receptores multipercursos têm seu desem-



(a) receptor Rake



(b) receptor MD

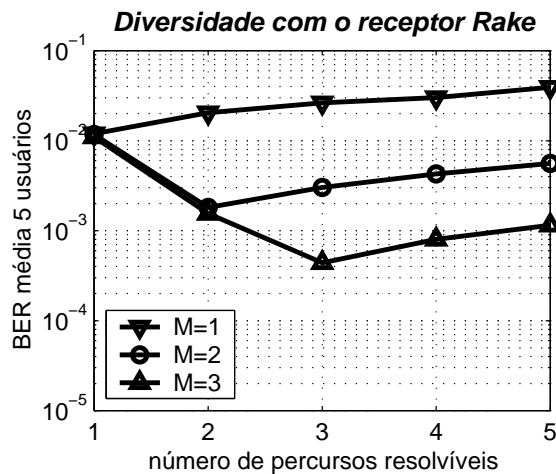
Fig. 6. Avaliação da diversidade do Rake e do MD com combinador EGC, para $E_b/N_0 = 20dB$ e canal Rayleigh multipercursos com perfil exponencial de energias.

penho degradado de forma semelhante aos receptores unipercursos, visto que haverá réplicas que, ao invés de contribuir para uma melhor detecção da informação, funcionarão predominantemente como interferentes.

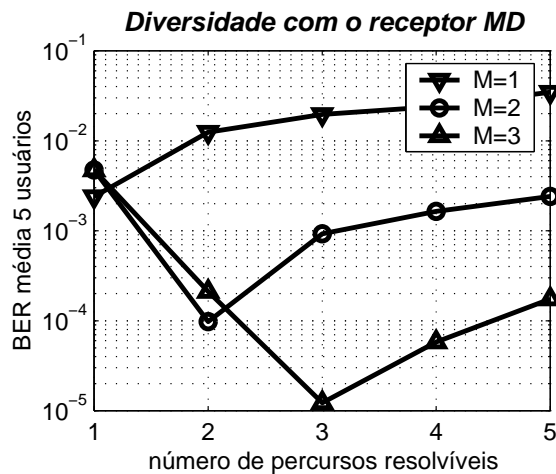
Quando se utiliza o combinador MRC (Figura 7) em lugar do EGC, observa-se uma ligeira melhoria no desempenho dos receptores. Com o MRC, o comportamento para os receptores considerados na condição de $M \leq L$ é semelhante ao com a utilização do EGC. No entanto, para o Rake com $M > L$, os comportamentos diferem, visto que os ramos excedentes serão inutilizados devido aos pesos nulos que serão associados aos seus correlacionadores, referentes às energias desses “percursos inexistentes”. Assim, receptores Rake com combinador MRC e $M > L$ resultarão em desempenhos equivalentes ao Rake completo na mesma condição, não havendo a degradação observada para EGC na situação de ramos excedentes.

No caso do MD com combinador MRC e $M > L$, a matriz de decorrelação antes do combinador (Figura 4) implica que o resultado do ramo excedente não será inutilizado com um simples peso nulo associado ao percurso referente. Assim, para o MD associado ao MRC também ocorre a degradação do desempenho na condição de ramos excedentes, como no EGC, no entanto, em menor proporção.

Um outro aspecto avaliado é a disparidade de potências entre usuários. Em um sistema DS-CDMA, quanto maior a disparidade, maior será a interferência de múltiplo acesso. Na Figura 8, obtiveram-se as BERs médias para dois usuários fracos (em uma população com quatro usuários) considerando os receptores multipercursos em configuração completa e canal Rayleigh com dois percursos. A relação de potências entre os usuários fracos e o ruído de fundo é mantida constante, $E_b/N_0 = 10dB$.



(a) receptor Rake



(b) receptor MD

Fig. 7. Avaliação da diversidade do Rake e do MD com combinador MRC, para $E_b/N_0 = 20dB$ e canal Rayleigh multipercursos com perfil exponencial de energias.

A combinação da disparidade de potências e dos valores de correlações cruzadas entre as seqüências dos usuários ativos determinam um parâmetro extremamente restritivo dos sistemas CDMA, a MAI. Realizaram-se simulações empregando três distintas famílias de seqüências: duas famílias determinísticas com boas propriedades de correlação cruzada, *Kasami Small* e *Gold* de comprimento 63; e, a de seqüências aleatórias de comprimento 10, *Rand 10*. Os desempenhos com as seqüências *Gold* e *Kasami Small* mostram-se muito semelhantes. Através da seqüência *Rand*, alcançaram-se os piores desempenhos, que se devem tanto ao ganho de processamento inferior como às piores propriedades de correlações cruzadas.

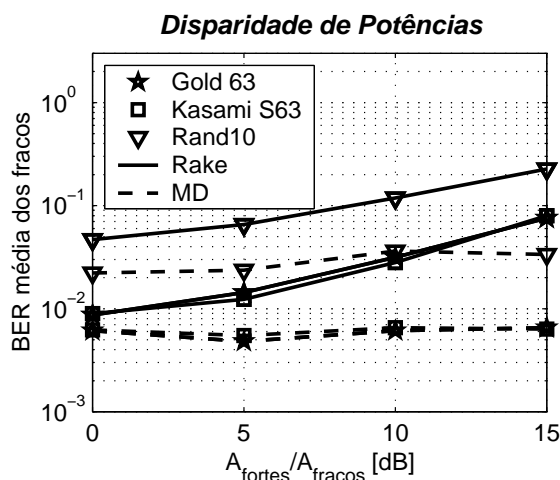


Fig. 8. Desempenhos para o *Rake* e o MD diante de situações de disparidade de potências, com $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ e canal *Rayleigh* dois percursos com perfil exponencial de energias.

Através destes resultados evidencia-se a principal vantagem das estruturas multiusuários: *robustez à disparidade de potências*. A estrutura *Rake* despreza os usuários interferentes, o que na condição de descontrolo de potências, ou mesmo em situações críticas de correlação cruzada entre as seqüências empregadas, resulta em uma considerável degradação de desempenho. Já a estrutura multiusuário MD processa as informações referentes aos usuários interferentes quando da detecção de cada um dos usuários de interesse, desacoplando a MAI. Isto resulta em um detector muito mais insensível ao desajuste entre as potências dos usuários.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo, constatou-se a degradação de desempenho das estruturas receptoras unipercursos convencional e decorrelacionadora diante de canais de rádio móveis DS-CDMA. Em contrapartida, as estruturas multipercursos *Rake* e MD propiciaram um expressivo ganho de desempenho diante desses canais. Através de simulações, mostrou-se que um número de ramos menor que o número de percursos resolvíveis recai em perda, parcial ou total, das vantagens da diversidade de percursos. De forma semelhante, um número de ramos excedendo o de percursos resolvíveis recai na degradação do desempenho; degradação esta que pode ser amenizada através

do combinador MRC, entretanto, recaindo em uma maior complexidade.

Portanto, o menor valor de BER em função do número de percursos resolvíveis ocorre na situação em que os números de percursos e ramos são iguais. No entanto, para que essa situação seja possível, é necessário estimar o canal de rádio móvel DS-CDMA com precisão e de maneira constante. Além do mais, para que a implementação do MD seja viável e vantajosa, faz-se necessário adotar aproximações para a matriz de transformação linear que mantenham a complexidade de implementação e a degradação nas figuras de desempenho em níveis razoáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] Raymond L. Pickholtz, Donald L. Schilling e Laurence B. Milstein, "Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial," *IEEE Transactions on Communications*, v. 30, n. 5, p. 855-84, Maio 1982.
- [2] Marvin K. Simon, Jim K. Omura, Robert A. Scholtz e Barry K. Levitt, *Spread Spectrum Communication Handbook*. 1 rev. McGraw-Hill, E.U.A. 1994.
- [3] John G. Proakis, *Digital Communications*. 3ª ed. Electrical and Computer Engineering, WCB/McGraw-Hill. 1995.
- [4] Ezio Biglieri, John Proakis e Shlomo Shamai, "Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects," *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 44, n. 6, p. 2619-92, Out. 1998.
- [5] Bernard Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communications Systems. Part I: Characterization," *IEEE Communications Magazine*, v. 35, n. 7, p. 90-100, Jul. 1997.
- [6] Bernard Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communications Systems. Part II: Mitigation," *IEEE Communications Magazine*, v. 35, n. 7, p. 102-9, Jul. 1997.
- [7] Athanasios Papoulis, *Probability, random variables, and stochastic processes*. 3ª ed. McGraw-Hill, Singapura 1991.
- [8] Sergio Verdú, *Multiuser Detection*. Johns Hopkins Series in the Cambridge University Press, E.U.A. 1998.
- [9] Gene H. Golub e Charles F. Van Loan, *Matrix Computations*. 3ª ed. Johns Hopkins Series in the Mathematical Sciences, Johns Hopkins Univ Press, Reino Unido. 1996.
- [10] Taufik Abrão, *Canceladores de Interferência Multiusuário Aplicados a Sistemas DS/CDMA de Múltipla Taxa*. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Fev. 2001.
- [11] Taufik Abrão e Paul Jean E. Jeszensky, "Detectores Multiusuários para DS/CDMA - Lineares Fixos," *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, v. 16, n. 2, p. 122-37, Dez. 2001.
- [12] R. Price e P. E. Green Jr, "A Communication Technique for Multipath Channels," *Proceedings of the IRE*, p. 555-69, Mar. 1958.
- [13] George Alifitiras, *Receiver Implementations for a CDMA Cellular System*. Dissertação de Mestrado. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Jul. 1996.
- [14] Thomas Eng, Ning Kong e Laurence B. Milstein, "Comparison of Diversity Combining Techniques for Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Transactions on Communications*, v. 44, n. 9, p. 1117-29, Set. 1996.
- [15] Howard C. Huang e Stuart C. Schwartz, "A Comparative Analysis of Linear Multiuser Detectors for Fading Multipath Channels," *Global Telecommunications Conference, 1994. GLOBECOM '94. Communications: The Global Bridge*, IEEE, 28 Nov-2, v. 1, p. 11-5, Dez. 1994.