

Comparação de Sistemas CDMA Multiportadora

Bruno A. Angélico, Paul Jean E. Jeszensky e Taufik Abrão

Resumo—Este trabalho faz uma análise comparada de três sistemas CDMA multiportadora: MC-CDMA, MC DS-CDMA ortogonal e MT-CDMA. Os resultados apresentados são obtidos analiticamente a partir de desenvolvimentos encontrados na literatura e também via simulação computacional Monte Carlo. Entre os esquemas analisados, o MC-CDMA apresentou o melhor desempenho em termos de probabilidade de erro de bit. Entretanto, tal conclusão se restringe às configurações utilizadas e às simplificações adotadas para a obtenção das figuras de mérito dos sistemas.

Palavras-Chave— Comunicações digitais, OFDM, CDMA.

Abstract—The present work brings a comparative performance study of three multicarrier CDMA systems: MC-CDMA, MC DS-CDMA orthogonal and MT-CDMA. The results are obtained analytically according to some developments found in the literature and also by Monte Carlo simulation. The MC-CDMA system had the best result in terms of bit error rate. However, it is important to point out that all conclusions are limited to the described configurations and also to the simplifications used in order to obtain the systems performance.

Keywords— Digital communications, OFDM, CDMA.

I. INTRODUÇÃO

Inicialmente proposta no começo da década de 90 por diversos autores [1], a combinação das técnicas OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e CDMA *Code Division Multiple Access*) gerou os denominados sistemas CDMA Multiportadora. Existem na literatura, basicamente, três técnicas oriundas dessa combinação: MC-CDMA (*Multi-Carrier CDMA*), MC DS-CDMA *Orthogonal* (*Multi-Carrier Direct Sequence CDMA Orthogonal*) e MT-CDMA (*Multi-Tone CDMA*). A motivação para o surgimento desses sistemas se deve, principalmente, à possibilidade de obtenção de maiores taxas de transmissão e à redução dos efeitos nocivos do canal de rádio móvel seletivo em frequência.

Os sistemas CDMA multiportadora são geralmente divididos em dois grupos: no primeiro, o espalhamento espectral é efetuado no domínio da frequência, ao passo que no segundo, o sinal é espectralmente espalhado no domínio do tempo (tal como nos sistemas DS-CDMA) em cada uma das múltiplas portadoras. O sistema MC-CDMA faz parte do primeiro grupo e os sistemas MC DS-CDMA ortogonal e MT-CDMA integram o segundo grupo.

II. MODELO DE CANAL

O modelo de canal empregado na determinação do desempenho dos sistemas multiportadora considera o efeito dos desvanecimentos correlacionados na frequência. Observe-se que

Bruno A. Angélico e Paul Jean E. Jeszensky estão na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil; e-mails: angelico@lcs.poli.usp.br, pjj@lcs.poli.usp.br.

Taufik Abrão é docente na Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, Brasil; e-mail: taufik@uel.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPESP (03/02586-0).

o grau de correlação dos desvanecimentos entre subcanais depende da banda de coerência do canal (Δf)_c e do espaçamento de frequência das sub-bandas utilizadas na modulação, Δf . Para uma descrição do modelo de canal adotado, veja [2] [3].

III. SISTEMAS CDMA MULTIPORTADORA

• MC-CDMA

No MC-CDMA [4], cada símbolo com duração T_s é transmitido em N subportadoras ortogonais. É fundamental que o período de símbolo seja muito maior que o espalhamento multipercurso do canal, τ_m , para combater os efeitos da interferência intersimbólica, resultando em um canal não-seletivo em frequência na banda de cada subportadora. A figura 1 ilustra o esquema básico de transmissão do MC-CDMA com modulação BPSK; $c_k(t) = [c_{k,0}, c_{k,1}, \dots, c_{k,G_{MC}-1}]$ representa a seqüência de espalhamento do k -ésimo usuário e G_{MC} , o ganho de processamento. N cópias paralelas de cada símbolo da seqüência de dados original são geradas. Cada uma dessas cópias é multiplicada por um *chip* da seqüência de espalhamento (nesse caso, $N = G_{MC}$). Os resultados dessas multiplicações modulam diferentes subportadoras ortogonais, cuja separação entre duas adjacentes é dada por $\Delta f = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{T_s}$, onde T_c representa o período de *chip*, caracterizando assim o espalhamento no domínio da frequência.

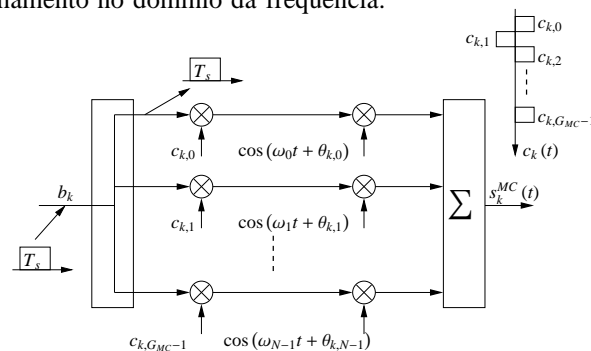


Fig. 1. Transmissão no sistemas MC-CDMA com modulação BPSK.

O sinal transmitido no sistema MC-CDMA correspondente ao k -ésimo usuário pode ser representado por:

$$s_k^{MC}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2P}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} b_k(i) \cdot c_{k,n} \cdot u_{T_s}(t - iT_s) \cdot \cos(\omega_n t + \theta_{k,n}) \quad (1)$$

onde P é a potência do sinal transmitido, $b_k(i)$, o i -ésimo símbolo de informação, $\omega_n = \omega_c + 2\pi\left(\frac{n}{T_s}\right)$, a frequência de transmissão da n -ésima subportadora ($\omega_c =$ frequência da portadora), $\theta_{k,n}$, a fase atribuída à n -ésima subportadora do k -ésimo usuário, $c_{k,n}$, o n -ésimo *chip* da seqüência de espalhamento $c_k(t)$ com amplitudes ± 1 equiprováveis e $u_{T_s}(\cdot)$, a formatação de pulso, assumida retangular.

No MC-CDMA a condição de ortogonalidade das subportadoras é mantida, respeitando-se o critério mínimo de separação

entre duas subportadoras adjacentes dado por $\Delta f = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{T_s}$. Assim, a largura de banda de cada subcanal, em banda base, é dada por $\frac{1}{T_s}$. Portanto, devido à sobreposição lateral de 50% dos lóbulos de frequência, a largura de banda total do sinal transmitido é dada por:

$$W^{MC} = (N - 1) \cdot \Delta f + \frac{2}{T_s} = (N - 1) \cdot \frac{1}{T_s} + \frac{2}{T_s} = \frac{N + 1}{T_s} \quad (2)$$

A figura 2 ilustra a recepção convencional para o MC-CDMA com $N = G_{MC}$. Os sinais provenientes das N subportadoras são combinados segundo uma regra adequada (diversidade em frequência). Contudo, é fundamental que os desvanecimentos sejam do tipo não-seletivo em frequência e de preferência independentes em cada subportadora. Nessa figura, $\phi_{k,n}$ corresponde à fase estimada para n -ésima subportadora do k -ésimo usuário, que depende de $\theta_{k,n}$, da fase introduzida pela distorção do canal ($\varphi_{k,n}$) e, no caso de sistema assíncrono, do atraso entre os usuários (ζ_k). O termo $d_{k,n}$ é dado pelo produto do n -ésimo ganho (que depende da regra de combinação) pelo n -ésimo chip da seqüência de espalhamento do usuário de índice k para a n -ésima subportadora.

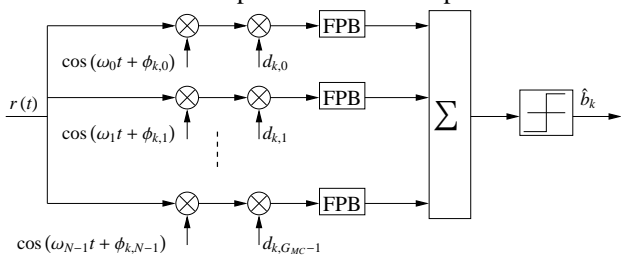


Fig. 2. Recepção convencional no sistema MC-CDMA com modulação BPSK para $N = G_{MC}$.

• MC DS-CDMA Ortogonal

O MC DS-CDMA Ortogonal combina o espalhamento no domínio do tempo com a modulação em subportadoras múltiplas. Os dados seriais a serem transmitidos são convertidos em N ramos paralelos, onde N representa o número de subportadoras. O espalhamento espectral, efetuado no domínio do tempo, é dado pela multiplicação de uma mesma seqüência de códigos (identificação do usuário) com a informação contida em cada um dos ramos. Logo após, o resultado dessa multiplicação modula N subportadoras ortogonais.

Devido à conversão S/P , tem-se, para um mesmo ganho de processamento, um maior período de chip em cada subportadora, o que facilita o sincronismo das seqüências de espalhamento no receptor, se comparado ao sistema DS-CDMA. Este esquema foi originalmente proposto para o canal reverso (*uplink*), devido ao fato de possibilitar a condição de quase sincronismo [5]. A figura 3 ilustra a transmissão com modulação BPSK; $c_k(t) = [c_{k,0}, c_{k,1}, \dots, c_{k,G_{MD}-1}]$ representa a seqüência de espalhamento do k -ésimo usuário e G_{MD} , o ganho de processamento. Após a conversão S/P , o período de símbolo de cada subportadora torna-se N vezes maior que o período de símbolo original.

O sinal transmitido pelo k -ésimo usuário é:

$$s_k^{MD}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{2P}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} b_{k,n}(i) u_{NT_s}(t - iNT_s) \cdot \cos(\omega_n t + \theta_{k,n}) \cdot c_k(t) \quad (3)$$

onde $\omega_n = \omega_c + 2\pi(\frac{n}{T_c})$ e NT_s representa o período de símbolo resultante da conversão S/P . Assume-se $c_k(t)$ cíclica com amplitudes ± 1 equiprováveis, tal que:

$$c_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_{k,i} u_{T_c}(t - iT_c) \quad (4)$$

Nesse sistema, mesmo após o espalhamento espectral, a condição de ortogonalidade das subportadoras é mantida, respeitando o critério mínimo de separação entre duas subportadoras adjacentes, dado por $\Delta f = \frac{1}{T_c}$. Com isso, a largura de banda em banda base de cada subcanal é dada por $\frac{1}{T_c}$.

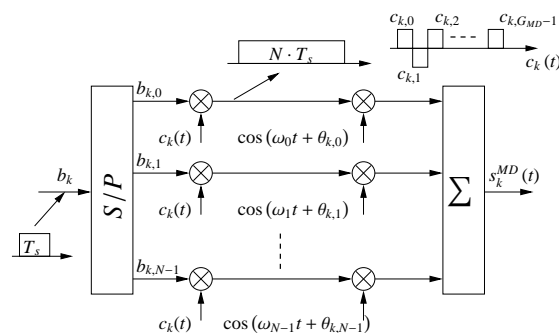


Fig. 3. Transmissão no sistemas MC DS-CDMA ortogonal com modulação BPSK.

Portanto, a largura de banda total do sinal transmitido é:

$$W^{MD} = (N - 1) \cdot \Delta f + \frac{2}{T_c} = \frac{N + 1}{T_c} = \frac{N + 1}{N \cdot T_s} \cdot G_{MD} \quad (5)$$

A recepção convencional para o MC DS-CDMA Ortogonal é ilustrada na figura 4. Inicialmente, o sinal transmitido é demodulado nos subcanais. Posteriormente, efetua-se o desespalhamento espectral em cada ramo paralelo pela mesma seqüência $c_k(t)$. Em seguida, o sinal resultante é submetido a um receptor do tipo *Rake*, onde o termo $d_{l_x,n}^{(k)}$ representa o ganho de combinação do l_x -ésimo percurso da n -ésima subportadora do usuário k e depende da regra de combinação (EGC: $d_{l_x,n}^{(k)} = 1$, MRC: $d_{l_x,n}^{(k)} = \beta_{l_x,n}^{(k)}$). Entretanto, o número

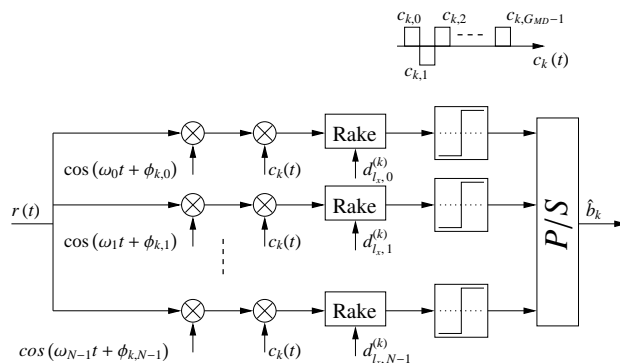


Fig. 4. Recepção convencional no sistema MC DS-CDMA ortogonal com modulação BPSK.

de subportadoras e o perfil de canal podem ser tais que os desvanecimentos em cada subcanal sejam não-seletivos em frequência. Nesse caso, o receptor *Rake* reduz-se a um receptor convencional de apenas um ramo. Após o *Rake*, efetua-se a decisão do símbolo detectado e, por meio da conversão P/S ,

os sinais paralelos são convertidos em um sinal serial com taxa N vezes maior do que a taxa em cada ramo paralelo.

• MT-CDMA

Assim como no MC DS-CDMA Ortogonal, no MT-CDMA, o sinal transmitido agrega a conversão S/P , o espalhamento espectral no domínio do tempo e a modulação em N subportadoras ortogonais. Entretanto, nesse último, a ortogonalidade das subportadoras é mantida apenas em relação ao período de símbolo de cada ramo paralelo, cuja duração é NT_s , ou seja, a separação entre subportadoras adjacentes é $\Delta f = \frac{1}{N \cdot T_s}$. Dessa forma, após o espalhamento espectral, o critério mínimo de separação das subportadoras é violado e a condição de ortogonalidade em relação ao período de *chip* não é satisfeita. A figura 5 ilustra a transmissão no MT-CDMA com modulação BPSK.

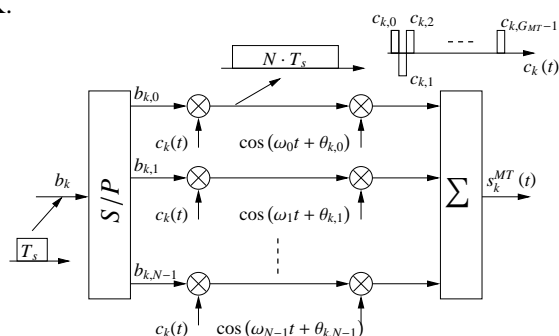


Fig. 5. Transmissão no sistemas MT-CDMA com modulação BPSK.

Devido à não ortogonalidade, o sistema sofre interferência entre subportadoras e apresenta maior sensibilidade aos desvios de frequência que, por ventura, possam ocorrer entre transmissor e receptor. Por outro lado, o ganho de processamento utilizado em tal sistema é relativamente maior (proporcional ao número de subportadoras) que nos demais esquemas considerados, inclusive o DS-CDMA, o que proporciona uma maior rejeição à interferência de múltiplo acesso.

O sinal transmitido correspondente ao k -ésimo usuário no MT-CDMA, s_k^{MT} , é descrito em (3), onde agora $\omega_n = \omega_c + 2\pi\left(\frac{n}{N \cdot T_s}\right)$.

No MT-CDMA a condição de ortogonalidade das subportadoras espaçadas de $\Delta f = \frac{1}{N \cdot T_s}$ não é mais mantida após o espalhamento espectral. A largura de cada subcanal em banda base é dada por $\frac{1}{T_c}$. Portanto, a largura de banda total do sinal transmitido é dada por:

$$W^{MT} = (N-1) \cdot \Delta f + \frac{2}{T_c} = \frac{N-1}{N \cdot T_s} + \frac{2 \cdot G_{MT}}{N \cdot T_s} = \frac{N-1+2 \cdot G_{MT}}{N \cdot T_s} \quad (6)$$

A recepção convencional para o MT-CDMA (figura 6) é semelhante à do sistema MC DS-CDMA ortogonal. Nesse caso, como a banda em cada subportadora é relativamente larga devido ao elevado ganho de processamento, para aplicações em telefonia móvel, há a necessidade de utilização de receptores *Rake* na grande maioria dos casos, pois o canal será seletivo em frequência na banda de cada subcanal.

IV. CANCELAMENTO DE INTERFERÊNCIA

Canceladores de Interferência Subtrativos, IC (*Interference Canceller*) [6], estimam os sinais dos usuários interferentes e

utilizam estas estimativas para reconstruir a parcela interferente e subtraí-la (cancelá-la) do sinal do usuário de interesse. Se todos os interferentes forem cancelados perfeitamente, o desempenho do receptor será ótimo. Entretanto, na prática, a interferência jamais poderá ser totalmente cancelada. Na implementação normalmente são utilizados mais de um estágio de cancelamento, visando obter melhores estimativas do sinal interferente a cada estágio para efetuar o cancelamento. Dentre os esquemas IC, o Cancelador de Interferência Paralelo, PIC (*Parallel Interference Canceller*), e o Sucessivo, SIC (*Successive Interference Canceller*) são indicados, respectivamente, para as situações onde há um certo controle de potência e considerável desbalanço de potência entre os sinais recebidos [6]. No presente trabalho foi considerado na recepção multiusuário dos sistemas CDMA multiportadora apenas o cancelamento de interferência paralelo, resultando as seguintes estruturas: MC-CDMA-PIC, MC DS-CDMA-PIC Ortogonal (doravante denominado apenas MC DS-CDMA-PIC) e MT-CDMA-PIC.

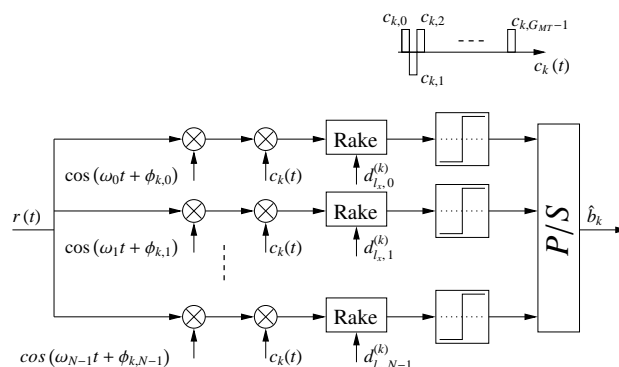


Fig. 6. Recepção convencional, sistema MT-CDMA e modulação BPSK.

V. METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS CDMA MULTIPORTADORA

Parte-se, inicialmente, da caracterização de um sistema DS-CDMA, como em [7]. Os parâmetros dos sistemas CDMA multiportadora são então derivados respeitando a largura de banda de canal e a taxa de transmissão de dados do sistema DS-CDMA original. Considere um sistema DS-CDMA com os seguinte parâmetros:

- Banda do Sistema: $W = 2/T_{c1}$ (período de *chip* T_{c1} e formatação de pulso retangular);
- Taxa de transmissão $R_x = 1/T_s$;
- Ganho de Processamento: G_{DS} (código curto $\rightarrow G_{DS} = T_s/T_{c1}$);
- Número de componentes multipercurso discerníveis: L_{DS} .

O número de percursos discerníveis em um sistema DS-CDMA é dado por [7], [8]:

$$L_{DS} = \left\lceil \frac{\tau_m}{T_{c1}} \right\rceil + 1 \quad (7)$$

sendo adotada a simplificação $L_{DS} - 1 \approx \frac{\tau_m}{T_{c1}}$. Doravante, considera-se:

$$\tau_m = (L_{DS} - 1) \cdot T_{c1} \quad (8)$$

Adicionalmente, a banda de coerência do canal pode ser representada por [3]:

$$(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi\tau_m} \quad (9)$$

Em relação ao sistema DS-CDMA, (8), tem-se:

$$(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi(L_{DS} - 1)T_{c1}} \quad (10)$$

Com isso, os parâmetros dos sistemas MC-CDMA, MC DS-CDMA Ortogonal e MT-CDMA são obtidos.

• MC-CDMA:

De (2) tem-se $W^{MC} = \frac{N+1}{T_s}$. Considerando que os sistemas MC-CDMA e DS-CDMA ocupam a mesma banda e possuem a mesma taxa de transmissão, obtém-se o número de subportadoras do sistema MC-CDMA:

$$\frac{N+1}{T_s} = \frac{2}{T_{c1}} \rightarrow N = 2 \cdot G_{DS} - 1 \quad (11)$$

O número de percursos discerníveis por subportadora no MC-CDMA é dado por:

$$L_{MC} = \left\lceil \frac{\tau_m}{T_s} \right\rceil + 1 = \left\lceil \frac{\tau_m}{G_{DS} \cdot T_{c1}} \right\rceil + 1 \quad (12)$$

Utilizando o resultado de (8), tem-se que:

$$L_{MC} = \left\lceil \frac{L_{DS} - 1}{G_{DS}} \right\rceil + 1 \quad (13)$$

• MC DS-CDMA Ortogonal:

Para o sistema MC DS-CDMA ortogonal fixa-se, primeiramente, o número de subportadoras (N) do sistema. De (5), conclui-se:

$$W^{MD} = \frac{(N+1)G_{MD}}{N \cdot T_s} = \frac{2}{T_{c1}} \rightarrow G_{MD} = \frac{2N G_{DS}}{N+1}, \quad (14)$$

pois $G_{DS} = \frac{T_s}{T_{c1}}$. Assim, para um dado N , encontra-se G_{MD} . O número de percursos discerníveis por subportadora é obtido considerando a mesma banda disponível para o DS-CDMA original, $L_{MD} = \left\lceil \frac{\tau_m}{T_c} \right\rceil + 1$. No entanto,

$$T_c G_{MD} = N T_{c1} G_{DS} \rightarrow T_c = \frac{N T_{c1} G_{DS}}{G_{MD}} \quad (15)$$

resultando em: $L_{MD} = \left\lceil \frac{G_{MD} \tau_m}{N T_{c1} G_{DS}} \right\rceil + 1$. Recorrendo novamente à equação (8), obtém-se:

$$L_{MD} = \left\lceil \frac{G_{MD} (L_{DS} - 1)}{N G_{DS}} \right\rceil + 1 \quad (16)$$

Da equação (14), tem-se finalmente:

$$L_{MD} = \left\lceil \frac{2(L_{DS} - 1)}{(N+1)} \right\rceil + 1 \quad (17)$$

• MT-CDMA:

Assim como no sistema MC DS-CDMA ortogonal, o número de subportadoras do sistema é inicialmente fixado. Da equação (6) tem-se que:

$$W^{MT} = \frac{N-1+2 \cdot G_{MT}}{N \cdot T_s} = \frac{2}{T_{c1}} \rightarrow G_{MT} = N \cdot G_{DS} + \frac{(1-N)}{2} \quad (18)$$

O número de percursos discerníveis por subportadora no sistema MT-CDMA é dado por $L_{MT} = \left\lceil \frac{\tau_m}{T_c} \right\rceil + 1$. Mas:

$$T_c G_{MT} = N T_{c1} G_{DS} \rightarrow T_c = \frac{N T_{c1} G_{DS}}{G_{MT}} \quad (19)$$

Assim:

$$L_{MT} = \left\lceil \frac{G_{MT} \tau_m}{N T_{c1} G_{DS}} \right\rceil + 1 \rightarrow L_{MT} = \left\lceil \frac{G_{MT} (L_{DS} - 1)}{N G_{DS}} \right\rceil + 1 \quad (20)$$

Da equação (18) em (20) resulta:

$$L_{MT} = \left\lceil \frac{2 G_{MT} (L_{DS} - 1)}{2 G_{MT} + (N - 1)} \right\rceil + 1 \quad (21)$$

• MC DS-CDMA Generalizado:

No sistema MC DS-CDMA Generalizado proposto em [7], o espaçamento de frequência entre subportadoras adjacentes é dado por $\Delta f = \frac{\Lambda}{N T_s}$, $\Lambda =$ inteiro positivo. Se $\Lambda = 1$, o sistema reduz-se ao MT-CDMA, ao passo que, se $\Lambda = G_{MD}$, o sistema reduz-se ao MC DS-CDMA ortogonal.

No sistema generalizado, a largura de banda de cada subcanal é igual a $1/T_c$. A largura de banda total do sistema é:

$$\begin{aligned} W^{Ger} &= (N-1) \cdot \Delta f + \frac{2}{T_c} = (N-1) \cdot \frac{\Lambda}{N T_s} + \frac{2}{T_c} \\ W^{Ger} &= (N-1) \frac{\Lambda}{G_{Ger} T_c} + \frac{2}{T_c} \end{aligned} \quad (22)$$

Novamente, o valor de N é fixado. Assim, em comparação ao sistema DS-CDMA, o ganho de processamento do sistema MC DS-CDMA Generalizado é obtido:

$$\begin{aligned} W^{Ger} &= (N-1) \frac{\Lambda}{G_{Ger} T_c} + \frac{2}{T_c} = \frac{2}{T_{c1}} \\ \rightarrow \frac{T_s}{T_{c1}} &= (N-1) \frac{\Lambda T_s}{2 G_{Ger} T_c} + \frac{T_s}{T_c} \end{aligned} \quad (23)$$

Mas, sabe-se que $N T_s = G_{Ger} T_c \rightarrow \frac{T_s}{T_c} = \frac{G_{Ger}}{N}$, que em (23) resulta em $G_{DS} = (N-1) \frac{\Lambda}{2N} + \frac{G_{Ger}}{N}$ e portanto:

$$G_{Ger} = N G_{DS} - \frac{(N-1)\Lambda}{2} \quad (24)$$

De (20) pode-se concluir que L_{Ger} é dado por:

$$L_{Ger} = \left\lceil \frac{G_{Ger} (L_{DS} - 1)}{N G_{DS}} \right\rceil + 1 \quad (25)$$

Da equação (24) em (25) resulta:

$$L_{Ger} = \left\lceil \frac{2 G_{Ger} (L_{DS} - 1)}{2 G_{Ger} + (N - 1) \Lambda} \right\rceil + 1 \quad (26)$$

Com isso, pode-se obter um Λ_{Om} que minimize a probabilidade de erro, resultado em um sistema MC DS-CDMA ótimo.

VI. RESULTADOS NUMÉRICOS

Na comparação dos sistemas adotou-se os seguintes parâmetros: $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20$ MHz, $L_f = 5$ ou 3, $K = 10$ usuários e fator de decrescimento (exponencial) do perfil atraso-potência do canal $\xi = 0,2$. Para os sistemas DS-CDMA multiportadora (MC DS-CDMA Ortogonal, Ótimo e MT-CDMA) considerou-se desvanecimentos não correlacionados na frequência. Por sua vez, como o sistema MC-CDMA

tira proveito da diversidade em frequência, a correlação em frequência do canal tem influência considerável no desempenho do sistema. Sendo assim, o desempenho desse último é obtido a partir do modelo de canal com amostras correlacionadas na frequência, seção II. Inicialmente são apresentados os resultados de desempenho analítico dos 3 sistemas DS-CDMA multiportadora com N variável, visando a obtenção do número de subportadoras mais adequado em termos de otimização de desempenho, figuras 7 e 8. Os três esquemas multiportadora descritos e o DS-CDMA convencional tiveram seus respectivos desempenhos (semi-)analíticos caracterizados em [3], sendo omitidos aqui.

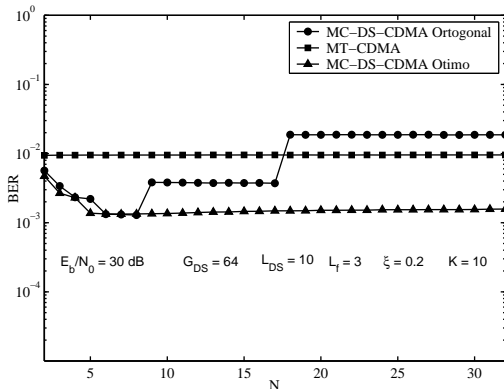


Fig. 7. Comparação dos sistemas DS-CDMA multiportadora considerando o número de subportadoras variável, $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20\text{ MHz}$, $K = 10$, $\xi = 0,2$ e $L_f = 3$.

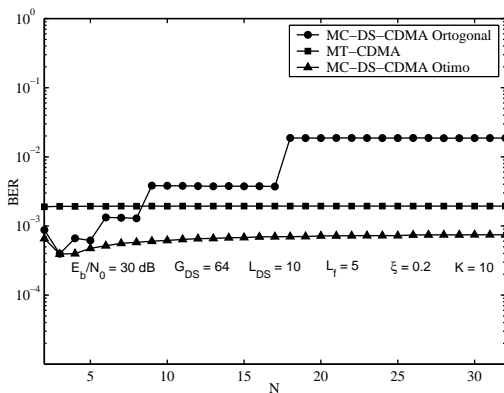


Fig. 8. Comparação dos sistemas DS-CDMA multiportadora considerando o número de subportadoras variável, $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20\text{ MHz}$, $K = 10$, $\xi = 0,2$ e $L_f = 5$.

Nota-se que o desempenho do sistema MT-CDMA manteve-se praticamente constante frente a variação de N . Assim, em ambos os casos, adotou-se $N_{MT} = 4$. Para o sistema MC DS-CDMA ortogonal, escolheu-se $N_{MD} = 7$ para $L_f = 3$ e $N_{MD} = 5$ para $L_f = 5$, de forma a manter o desempenho semelhante ao do MC DS-CDMA ótimo, figuras 9 e 10. Uma vez que no MC-CDMA o número de percursos resultantes em cada subportadora é igual a 1 ($L_{MC} = 1$), não há ganho de desempenho com a utilização do *Rake*.

O desempenho do MC-CDMA é consideravelmente superior aos demais sistemas multiportadora e também ao DS-CDMA. Com vistas à obtenção de melhorias de desempenho, foi acoplado um estágio de cancelamento paralelo PIC aos sistemas MC DS-CDMA e MT-CDMA. Os resultados com recepção convencional foram obtidos analiticamente e via simulação

computacional Monte Carlo, ao passo que os resultados com PIC foram obtidos somente por meio de simulação Monte Carlo. Em todos os casos simulados foram consideradas amostras correlacionadas na frequência. Para verificar o efeito da correlação em frequência do canal no sistema MC-CDMA, dois casos distintos de banda de coerência foram empregados para esse sistema: $(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi\tau_m}$ e $(\Delta f)_c = \frac{1}{\tau_m}$, pois comumente considera-se que a banda de coerência do canal é aproximadamente o recíproco do espalhamento multipercursos [9]. Para os sistemas DS-CDMA multiportadora em questão considerou-se nas simulações apenas $(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi\tau_m}$, uma vez que tais sistemas não aproveitam a diversidade na frequência. Os coeficientes de canal foram gerados com $f_m = 110\text{ Hz}$. Entretanto, como o canal foi considerado invariante dentro de um período de símbolo e perfeitamente estimado na recepção, o efeito pernicioso da frequência *Doppler* sobre o desempenho foi mitigado, figuras 11 e 12.

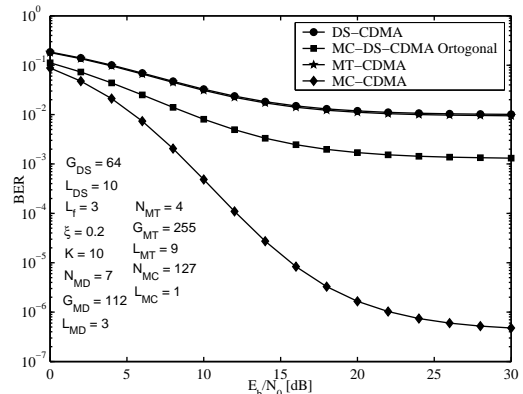


Fig. 9. Comparação entre os sistemas CDMA multiportadora e DS-CDMA com $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20\text{ MHz}$, $K = 10$, $\xi = 0,2$ e $L_f = 3$.

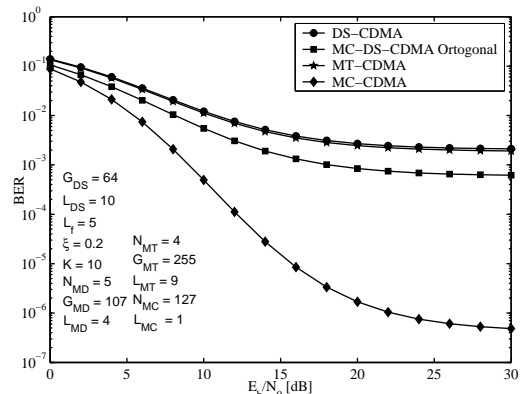


Fig. 10. Comparação entre os sistemas CDMA multiportadora e DS-CDMA com $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20\text{ MHz}$, $K = 10$, $\xi = 0,2$ e $L_f = 5$.

No MC-CDMA o desempenho reduziu-se quando considerado $(\Delta f)_c = \frac{1}{\tau_m}$. Isso é explicado pelo fato de que, quanto maior a banda de coerência do canal, maior o grau de correlação das amostras na frequência e, conseqüentemente, menor o ganho de diversidade. Já para os sistemas DS-CDMA multiportadora, a correlação das amostras do canal praticamente não influenciou o desempenho. Isso pode ser verificado pelo fato de as curvas teóricas (que consideram amostras independentes na frequência) e simuladas (que consideram raios correlacionados com $(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi\tau_m}$ e $W = 20\text{ MHz}$) coincidirem em todos os casos avaliados.

Nos sistemas DS-CDMA multiportadora o emprego do cancelador de interferência de um estágio produziu melhorias significativas no desempenho. No MC DS-CDMA ortogonal essa melhoria não foi muito diferente para $L_f = 3$ e $L_f = 5$. Já no MT-CDMA, este ganho foi mais acentuado quando $L_f = 5$.

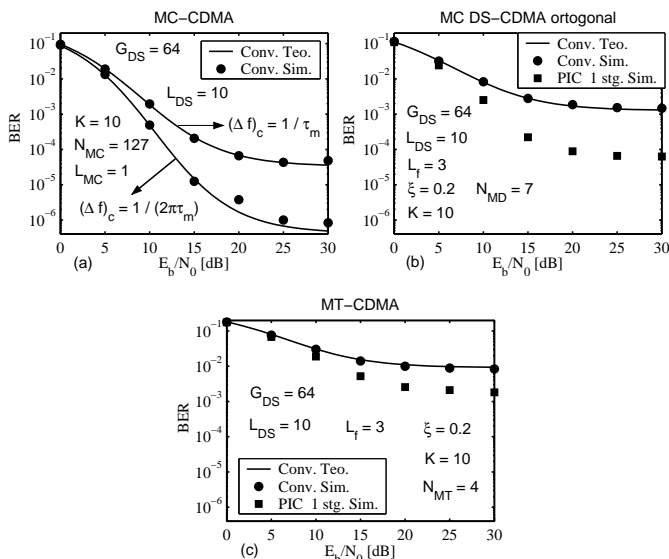


Fig. 11. Comparação entre os sistemas CDMA multiportadora com $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20\text{ MHz}$, $K = 10$, $\xi = 0,2$ e $L_f = 3$ para os sistemas DS-CDMA multiportadora.

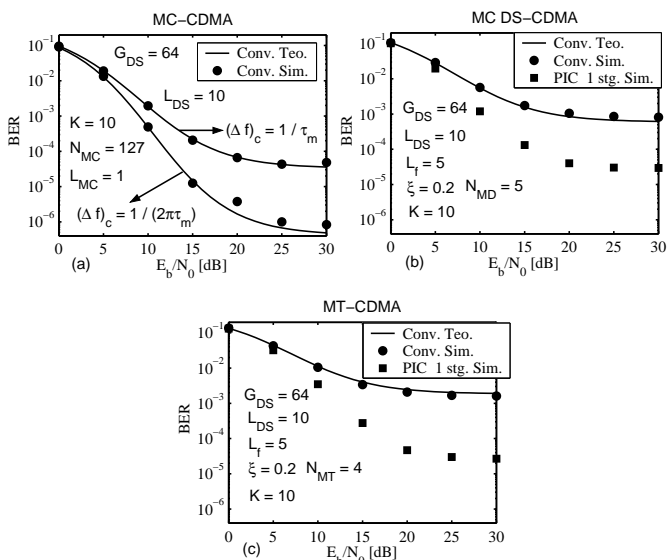


Fig. 12. Comparação entre os sistemas CDMA multiportadora com $G_{DS} = 64$, $L_{DS} = 10$, $W = 20\text{ MHz}$, $K = 10$, $\xi = 0,2$ e $L_f = 5$ para os sistemas DS-CDMA multiportadora.

Note que o sistema MC-CDMA com $(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi\tau_m}$ superou o desempenho dos demais sistemas, mesmo com o emprego do PIC, tanto para $L_f = 3$ como para $L_f = 5$. Isso evidencia que, para as configurações analisadas, o emprego da diversidade em frequência traz grandes benefícios para o desempenho do MC-CDMA.

Para $L_f = 3$, o MC DS-CDMA-PIC teve um desempenho da mesma ordem do observado no MC-CDMA para $(\Delta f)_c = \frac{1}{\tau_m}$, porém ainda um pouco inferior. Já o MT-CDMA-PIC, apesar de apresentar uma melhoria em relação ao MT-CDMA

convencional, ainda assim resulta em pior desempenho que o MC-CDMA, pois uma parcela considerável da energia do sinal transmitido é desperdiçada na recepção, pois apenas três percursos dos dez discerníveis são aproveitados no *Rake*.

Para $L_f = 5$, os sistemas MC DS-CDMA-PIC e MT-CDMA-PIC tiveram um desempenho bem parecido e um pouco superior ao do MC-CDMA com $(\Delta f)_c = \frac{1}{\tau_m}$. Nessa configuração pode-se verificar que o ganho do MT-CDMA-PIC foi um pouco superior ao do MC DS-CDMA-PIC, pois o MT-CDMA convencional apresenta um desempenho inferior ao do MC DS-CDMA Ortogonal convencional.

VII. CONCLUSÕES

Dos resultados apresentados o sistema MC-CDMA apresentou desempenho sempre superior aos demais sistemas quando $(\Delta f)_c = \frac{1}{2\pi\tau_m}$. Para $(\Delta f)_c = \frac{1}{\tau_m}$, o desempenho do MC-CDMA sofreu uma redução e ficou dentro da mesma ordem de grandeza do desempenho do sistema MC DS-CDMA-PIC para $L_f = 3$ e $L_f = 5$ e do MT-CDMA-PIC para $L_f = 5$. Entretanto, é importante ressaltar que tais conclusões são feitas sobre características de canal e parâmetros de sistema específicos. Uma comparação mais justa pode ser feita com medidas reais das características de comportamento do canal em um dado ambiente, tais como: banda de coerência, número de percursos discerníveis para um a certa largura de banda W e máxima frequência *Doppler*.

Ressalte-se ainda que os efeitos da razão entre a potência média e a potência de pico do sinal transmitido, PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*), erros de sincronismo das subportadoras e complexidade de implementação não foram considerados nessa comparação. Além disso, todas as características de canal, do atraso entre os usuários e de potência transmitida foram perfeitamente estimadas no receptor. Para uma comparação mais completa, todos esses detalhes devem ser levados em consideração.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Prasad and S. Hara. An overview of multi-carrier cdma. *IEEE Communications Magazine*, pages 126–133, December 1997.
- [2] B. A. Angélico, P. J. E. Jeszensky, and T. Abrão. Sistema mc-cdma com cancelamento de interferência paralelo e desvanecimentos correlacionados na frequência. *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBTr'04, Belém, PA*, 06-09 de Setembro 2004.
- [3] B. A. Angélico. *Sistemas CDMA Multiportadora*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP. São Paulo - SP, 2005. Disponível em <http://www.lcs.poli.usp.br/~pjj>.
- [4] N. Yee, J. P. Linnartz, and G. Fettweis. Multi-carrier cdma in indoor wireless radio networks, in. *Proc. PIMRC' 93*, pages 109–113, Yokohama, Japan, Sept 1993.
- [5] V. M. Da Silva and E. S. Sousa. Performance of orthogonal cdma codes for quasi-synchronous communication systems, in. *Proc. of IEEE ICUP '93*, pages 995–999, Ottawa, Canada, October 1993.
- [6] T. Abrão. *Canceladores de Interferência Multiusuário Aplicados a Sistemas DS/CDMA de Múltipla Taxa*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP. São Paulo - SP, 2001.
- [7] L. Yang and L. Hanzo. Performance of generalized multicarrier ds-cdma over nakagami- m fading channels. *IEEE Transactions on Communication*, 50(6):956–966, June 2002.
- [8] S. Kondo and L. B. Milstein. Performance of multicarrier ds cdma systems. *IEEE Transactions on Communications*, 44:238–246, February 1996.
- [9] X. Gui and T. Sang Ng. Performance of asynchronous orthogonal multicarrier cdma system in frequency selective fading channel. *IEEE Transactions on Communications*, 47:1084–1091, July 1999.