

Brincando com Blocos: Uma Nova Combinação da Transmissão em Blocos com a Técnica de Múltiplo Acesso CDMA

Leonel Arévalo, Raimundo Sampaio Neto e César A. Medina

Resumo—Este artigo examina uma nova possível combinação da transmissão em blocos com portadora única (SC-Single Carrier) e a técnica de múltiplo acesso CDMA (*Code Division Multiple Access*), aqui referida como SC DS-CDMA. Comparações de desempenho com o sistema de transmissão por blocos CDMA de portadora única conhecido como SC CDMA são apresentadas. Uma característica marcante da técnica de transmissão enfocada é que, diferentemente do que ocorre nos sistemas SC CDMA, a ortogonalidade entre os códigos dos diferentes usuários é mantida mesmo quando a transmissão é feita através de um canal multipercurso seletivo na frequência, permitindo assim que os usuários possam ser idealmente desacoplados na recepção. Além desta vantagem, e muito devido a ela, os resultados de desempenho, obtidos via simulação, indicam uma significativa superioridade do sistema proposto sobre o tradicional SC CDMA. Os resultados consideram recepção com equalização no domínio da frequência utilizando equalizadores do tipo ZF (*Zero Forcing*) e MMSE (*Minimum Mean Squared Error*), e supõem conhecimento ideal dos canais de transmissão.

Palavras-Chave— Transmissão em Blocos, Portadora Única, CDMA, Canais Seletivos em Frequência, Desacoplamento Ideal dos Usuários.

Abstract— This paper addresses a new possible combination of the single carrier (SC) block transmission and the Code Division Multiple Access (CDMA) techniques. Performance comparisons with the traditional SC CDMA block transmission system are presented. A key feature of the proposed transmission technique is that, differently from what occurs with SC CDMA, the original code orthogonality between users is preserved despite propagation through multipath frequency selective channels, thus ideally allowing the decoupling of the signals at the receiver side. Beyond this advantage, and mostly due to it, the performance results indicate a clear superiority of the proposed system over the traditional SC CDMA. The simulation results consider frequency domain ZF (*Zero Forcing*) and MMSE (*Minimum Mean Squared Error*) equalization and assume perfect knowledge of the transmission channels.

Keywords— Block Transmission, Single Carrier, CDMA, Frequency Selective Channel, Ideal User Decoupling.

I. INTRODUÇÃO

A presença de canais com multipercurso em um sistema de comunicação, tais como os típicos em sistemas móveis celulares, limita severamente o seu desempenho. Um dos efeitos deletérios deste tipo de canal quando sistemas convencionais de transmissão serial dos símbolos de informação são utilizados, é o surgimento da interferência entre símbolos

(ISI). Uma alternativa para lidar com este problema é a adoção de transmissão por blocos (de símbolos), que dá lugar à presença de interferência entre blocos (IBI), mas que pode ser evitada por meio da inserção de um intervalo de guarda. A inserção de um intervalo de guarda apropriado permite também a significativa simplificação do processo de estimação de canal/equalização na recepção, com este procedimento sendo realizado no domínio da frequência [1]-[5]. Após a inserção do intervalo de guarda, os blocos de símbolos resultantes podem ser transmitidos em forma de portadora única (SC-Single Carrier Block Transmission) ou multiportadora (MC - Multi Carrier Block Transmission). Um esquema eficiente de transmissão multiportadora por blocos que permite a redução da faixa de frequência requerida para a transmissão utiliza subportadoras ortogonais entre si (OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [6].

Os sistemas além da terceira geração possuem requerimentos de transmissão de dados, capacidade, eficiência e mobilidade cada vez mais exigentes. Para satisfazer estes requerimentos novas tecnologias estão sendo investigadas com crescente interesse. Nesta direção, combinações da técnica de múltiplo acesso DS-CDMA (Direct Sequence-Code Division Multiple Access) com a técnica de transmissão multiportadora OFDM originaram diferentes esquemas de múltiplo acesso. Na literatura basicamente encontramos duas técnicas principais: CDMA multiportadora (MC CDMA) [7] e DS-CDMA multiportadora (MC DS-CDMA) [8]. Esquemas de múltiplo acesso têm sido propostos também em modulação de portadora única [9], [10]. O sistema de transmissão por blocos CDMA de portadora única (SC CDMA) é o conhecido DS-CDMA com intervalos de guarda entre símbolos. Os esquemas de transmissão em blocos com portadora única não apresentam alguns dos problemas que afetam os sistemas multiportadoras, tais como alto PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) e sensibilidade ao ruído de fase e ao desvio da portadora [10]. Este artigo examina uma nova possível combinação da transmissão em blocos com portadora única e a técnica de múltiplo acesso CDMA, aqui referida como SC DS-CDMA. Comparações de desempenho, em presença de ruído e múltiplos usuários, com o sistema SC CDMA são apresentadas. Uma característica marcante da técnica de transmissão enfocada é que, diferentemente do que ocorre nos sistemas SC CDMA, a ortogonalidade entre os códigos dos diferentes usuários é mantida mesmo quando a transmissão é feita através de um canal multipercurso seletivo na frequência, permitindo assim que os usuários possam ser idealmente desacoplados

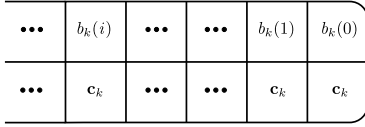


Fig. 1. Representação da sequência de blocos transmitidos pelo k -ésimo usuário (SC CDMA).

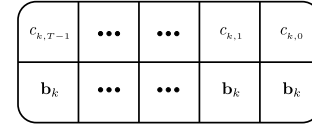


Fig. 2. Representação da sequência de T blocos transmitidos pelo k -ésimo usuário (SC DS-CDMA)

na recepção. Além desta vantagem, e muito devido a ela, os resultados de desempenho, obtidos via simulação, indicam uma significativa superioridade do sistema proposto sobre o tradicional SC CDMA. Os resultados consideram recepção com equalização no domínio da frequência utilizando equalizadores do tipo ZF (*Zero Forcing*) e MMSE (*Minimum Mean Squared Error*), e supõem conhecimento ideal dos canais de transmissão.

Notação: Caracteres maiúsculos em negrito representam matrizes; caracteres minúsculos em negrito denotam vetores. Os operadores $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$ denotam transposta e hermitiana, respectivamente, $(\cdot)^{-1}$ representa inversão de matriz e o operador $\mathbb{E}[\cdot]$ denota valor esperado.

II. MODELAGEM MATEMÁTICA *Single Carrier* CDMA

Considera-se aqui a transmissão em blocos com portadora única (SC) para o canal de subida (*Up-link*) de um sistema CDMA com K usuários ativos. Os usuários, empregam sequências de espalhamento ortogonais, e o canal discreto que liga o transmissor do k -ésimo usuário a estação radio-base, \mathbf{h}_k , é modelado como um filtro FIR (*Finite-duration Impulse Response*) de tamanho P. Supõe-se também que uma faixa de guarda de tamanho suficiente L ($L \geq P$) do tipo CP (Prefixo Cíclico) [11] é inserida antes da transmissão de cada bloco para permitir a eliminação da interferência entre blocos sucessivos após o processamento no receptor. A seguir são apresentadas a modelagem dos sinais para um sistema SC CDMA e o para a técnica proposta neste artigo aqui referida como SC DS-CDMA.

A. Sistema SC CDMA

Considera-se a transmissão síncrona em um canal de subida com K usuários ativos. O k -ésimo usuário transmite sequencialmente símbolos binários, $b_k(i) \in \{\pm 1\}$. Cada símbolo é espalhado por uma sequência de código de tamanho T, $\mathbf{c}_k = [c_{k,0} \dots c_{k,T-1}]^T$, com $c_{k,i} \in \{\pm \frac{1}{\sqrt{T}}\}$ ($\|\mathbf{c}_k\|^2 = 1$). O bloco transmitido em um esquema SC CDMA pelo k -ésimo usuário na i -ésima transmissão é dado por $\mathbf{c}_k b_k(i)$, ($i = 1, 2, \dots$). A Figura 1 ilustra a sequência de blocos transmitidos no sistema SC CDMA considerado.

Para garantir que o sistema opere sem interferência entre blocos (IBI) é inserida a cada bloco transmitido uma faixa de guarda de tamanho L resultando em um bloco a ser transmitido de tamanho $M=T+L$. As transmissões são feitas através do canal multipercurso \mathbf{h}_k de comprimento P. Admite-se aqui que o canal se mantém fixo ao longo da transmissão. A transmissão através do canal pode ser representada por uma matriz de convolução Toeplitz triangular inferior \mathbf{H}_k de

dimensão $M \times M$, na qual a primeira coluna é a resposta do canal concatenada com zeros: $[\mathbf{h}_k, 0 \dots 0]^T$, onde $\mathbf{h}_k = [h_{k,0}, h_{k,1}, \dots, h_{k,P-1}]^T$, com $\|\mathbf{h}_k\|^2 = 1$. Na estação radio base, a faixa de guarda CP é removida do bloco recebido, o que elimina a IBI e transforma a matriz convolução \mathbf{H}_k em uma matriz circulante \mathbf{H}_{c_k} , de dimensão $T \times T$ com a primeira coluna dada por:

$$\mathbf{h}_{k,ext} = [h_{k,0}, h_{k,1}, \dots, h_{k,P-1}, \mathbf{0}_{(1,T-P)}]^T. \quad (1)$$

O sinal composto recebido na estação radio base correspondente a transmissão do i -ésimo bloco é então dado por:

$$\mathbf{r}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{c_k} \mathbf{c}_k b_k(i) + \mathbf{n}(i), \quad (2)$$

onde $\mathbf{n}(i)$ é ruído gaussiano complexo de média nula e matriz covariância $\mathbf{K}_n = \sigma^2 \mathbf{I}_T$; $b_k(i)$ é o i -ésimo símbolo transmitido do k -ésimo usuário com $|b_k(i)|^2 = 1$ e $\mathbb{E}[b_k(i)] = 0$.

B. Sistema SC DS-CDMA

No sistema aqui proposto considera-se uma inversão entre os símbolos de informação e os chips do código de espalhamento na estrutura representada na Figura 1: um bloco com N símbolos de informação, $\mathbf{b}_k = [b_k(0), b_k(1), \dots, b_k(N)]^T$, é formado e substituí na estrutura da Figura 1, o bloco \mathbf{c}_k de chips, enquanto os símbolos $b_k(i)$ nesta estrutura são substituídos pelos chips $c_{k,i}$ do código do usuário. Esta nova estrutura de transmissão é representada na Figura 2. Como será visto adiante o esquema proposto permite que a ortogonalidade entre os códigos dos diferentes usuários seja preservada, apesar da transmissão através de um canal multipercurso seletivo em frequência. Assim, o bloco transmitido em um esquema SC DS-CDMA pelo k -ésimo usuário na i -ésima transmissão é dado por $\mathbf{b}_k c_{k,i}$ ($i=0,1,2,\dots,T-1$) onde $c_{k,i}$ é o i -ésimo chip da sequência de espalhamento \mathbf{c}_k . Após a inserção de uma faixa de guarda CP de tamanho L no bloco $\mathbf{b}_k c_{k,i}$, os elementos do bloco resultante de tamanho N+L são transmitidos sequencialmente através do canal multipercurso \mathbf{h}_k , definido na seção anterior. Na estação rádio base, o prefixo cíclico é removido do bloco recebido. Assim, por analogia ao que foi descrito na seção anterior e considerando-se (2), tem-se que o sinal recebido na estação rádio base é da forma:

$$\mathbf{r}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{c_k} \mathbf{b}_k c_{k,i} + \mathbf{n}(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (3)$$

onde \mathbf{H}_{c_k} é uma matriz circulante de tamanho $N \times N$ e $\mathbf{n}(i)$ representa o vetor de ruído gaussiano branco de média nula e matriz covariância $\mathbb{E}[\mathbf{n}(i)\mathbf{n}^H(i)] = \sigma^2 \mathbf{I}_N$. Coletando-se os

sinais recebidos associados aos T chips, obtém-se uma matriz de dimensão $N \times T$, que pode ser expressa da forma

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}(0) \dots \mathbf{r}(T-1)] = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{c_k} \mathbf{b}_k \mathbf{c}_k^T + \mathbf{N}, \quad (4)$$

onde $\mathbf{N} = [\mathbf{n}(0) \dots \mathbf{n}(T-1)]$.

III. EQUALIZAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DETECÇÃO EM SC CDMA

No receptor SC CDMA, uma DFT (*Discrete Fourier Transform*) normalizada é aplicada ao sinal recebido SC CDMA dado por (2) transformando $\mathbf{r}(i)$ do domínio do tempo para o domínio da frequência. A DFT normalizada é representada por uma matriz \mathbf{W}_T tal que $\mathbf{W}_T^H \mathbf{W}_T = \mathbf{W}_T \mathbf{W}_T^H = \mathbf{I}_T$. Suas componentes são dadas por:

$$[\mathbf{W}_T]_{m,v} = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{-j\frac{2\pi}{T}mv} \quad 0 \leq m, v \leq T-1. \quad (5)$$

Assim, o sinal recebido no domínio da frequência é da forma:

$$\tilde{\mathbf{r}}(i) = \mathbf{W}_T \mathbf{r}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{W}_T \mathbf{H}_{c_k} \mathbf{c}_k b_k(i) + \mathbf{W}_T \mathbf{n}(i). \quad (6)$$

Sendo uma matriz circulante, a matriz $T \times T$, \mathbf{H}_{c_k} , em (6) pode ser decomposta na forma

$$\mathbf{H}_{c_k} = \mathbf{W}_T^H \mathbf{H}_{d_k} \mathbf{W}_T, \quad (7)$$

onde \mathbf{H}_{d_k} é matriz diagonal cujas entradas são os elementos da resposta de frequência do canal discreto, dada pelo vetor $T \times 1$

$$\mathbf{q}_k = \sqrt{T} \mathbf{W}_T \mathbf{h}_{k,ext}, \quad (8)$$

sendo $\mathbf{h}_{k,ext}$ a resposta ao impulso do canal discreto, estendida com zeros, dada em (1). Substituindo-se (7) em (6), obtém-se:

$$\tilde{\mathbf{r}}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{d_k} \mathbf{W}_T \mathbf{c}_k b_k(i) + \tilde{\mathbf{n}}(i), \quad (9)$$

onde o vetor de ruído $\tilde{\mathbf{n}}(i) = \mathbf{W}_T \mathbf{n}(i)$ é gaussiano complexo de média nula e matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}} = \sigma^2 \mathbf{I}_T$.

A. SC CDMA com equalização Zero Forcing.

Supondo que m é o índice do usuário de interesse, o equalizador ZF elimina a interferência entre chips deste usuário por meio da multiplicação do sinal composto $\tilde{\mathbf{r}}(i)$ em (9) pela matriz

$$\mathbf{E}_{m,zf} = [\mathbf{H}_{d_m} \mathbf{W}_T]^{-1} = \mathbf{W}_T^H \mathbf{H}_{d_m}^{-1}. \quad (10)$$

Assim, o bloco equalizado correspondente ao m -ésimo usuário, a ser entregue ao decisor, $\tilde{\mathbf{r}}_m(i)$, é

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_m(i) &= \mathbf{E}_{m,zf} \tilde{\mathbf{r}}(i) \\ &= \mathbf{c}_m b_m(i) + \mathbf{i}_{IMA} + \mathbf{n}_w(i), \end{aligned} \quad (11)$$

onde o segundo termo de (11) representa a interferência de múltiplo acesso (IMA) do sistema e $\mathbf{n}_w(i) = \mathbf{E}_{m,zf} \tilde{\mathbf{n}}(i)$ representa o vetor de ruído após equalização.

Após equalização, o símbolo detectado do usuário m , $b_m(i)$, pode ser obtido por:

$$\begin{aligned} \hat{b}_m(i) &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{c}_m^T \tilde{\mathbf{r}}_m(i))] \\ &= \text{sgn}[\text{Re}(b_m(i) + \mathbf{c}_m^T \mathbf{i}_{IMA} + \mathbf{c}_m^T \mathbf{n}_w(i))]. \end{aligned} \quad (12)$$

B. SC CDMA com equalização MMSE.

O equalizador MMSE \mathbf{w}_m destinado à detecção do m -ésimo usuário e obtido por:

$$\mathbf{w}_m = \arg \min_{\mathbf{w}} \mathbb{E}[\|b_m(i) - \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{r}}(i)\|^2], \quad (13)$$

cujas solução é o vetor de dimensão T

$$\mathbf{w}_m = \mathcal{R}^{-1} \mathbb{E}[\tilde{\mathbf{r}}(i) b_m(i)], \quad (14)$$

onde \mathcal{R}^{-1} é a inversa da matriz autocorrelação da observação $\tilde{\mathbf{r}}(i)$ em (9) dada por:

$$\mathcal{R} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{d_k} \mathbf{W}_T \mathbf{c}_k \mathbf{c}_k^H \mathbf{W}_T^H \mathbf{H}_{d_k}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_T, \quad (15)$$

e

$$\mathbb{E}[\tilde{\mathbf{r}}(i) b_m(i)] = \mathbf{H}_{d_m} \mathbf{W}_T \mathbf{c}_m. \quad (16)$$

Após a equalização o símbolo detectado do m -ésimo usuário é obtido por meio de

$$\hat{b}_m(i) = \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{w}_m^H \tilde{\mathbf{r}}(i))]. \quad (17)$$

IV. EQUALIZAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DETECÇÃO EM SC DS-CDMA

Uma DFT normalizada, \mathbf{W}_N , é aplicada ao sinal recebido SC DS-CDMA em (3). Assim, considerando a decomposição da matriz circulante $N \times N$, \mathbf{H}_{c_k} , na forma dada em (7), a matriz \mathbf{R} definida em (4) se torna

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{W}_N \mathbf{R} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{d_k} \mathbf{W}_N \mathbf{b}_k \mathbf{c}_k^T + \tilde{\mathbf{N}}, \quad (18)$$

com $\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{W}_N \mathbf{N}$.

De (18) pode ser visto que a ortogonalidade entre os códigos dos usuários é mantida apesar da transmissão através do canal multipercurso. Portanto, neste esquema, diferentemente do SC CDMA, a IMA pode ser eliminada; podendo isto inclusive ser feito antes da equalização e demais procedimentos de detecção. O sinal a ser equalizado correspondente ao m -ésimo usuário é obtido por

$$\mathbf{r}_m = \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{c}_m = \mathbf{H}_{d_m} \mathbf{W}_N \mathbf{b}_m + \mathbf{n}_f, \quad (19)$$

onde $\mathbf{n}_f = \tilde{\mathbf{N}} \mathbf{c}_m$ é vetor de ruído gaussiano branco, de média nula e matriz covariância $\mathbb{E}[\mathbf{n}_f \mathbf{n}_f^H] = \|\mathbf{c}_m\|^2 \sigma^2 \mathbf{I}_N = \sigma^2 \mathbf{I}_N$. Ressalte-se que o sinal em (19) não possui componentes de IMA.

A. SC DS-CDMA com equalização Zero Forcing.

O equalizador ZF elimina a interferência entre símbolos do componente de sinal em (19) através da multiplicação de \mathbf{r}_m pela matriz

$$\mathbf{E}_{m,zf} = \mathbf{W}_N^H \mathbf{H}_{d_m}^{-1}. \quad (20)$$

Após a equalização o bloco de N símbolos de informação é detectado por meio de

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{b}}_m &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{E}_{m,zf} \mathbf{r}_m)] \\ &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{b}_m + \mathbf{n}_w)], \end{aligned} \quad (21)$$

onde $\mathbf{n}_w = \mathbf{E}_{m,zf} \mathbf{n}_f$ é o vetor de ruído após equalização.

B. SC DS-CDMA com Equalização MMSE.

O equalizador MMSE do sinal em (19) é dado pela matriz $N \times N$

$$\mathbf{E}_{m,MMSE} = \arg \min_{\mathbf{E}} \mathbb{E}[\|\mathbf{b}_m - \mathbf{E} \mathbf{r}_m\|^2], \quad (22)$$

cujas solução é

$$\mathbf{E}_{m,MMSE} = \mathbf{W}_N^H \mathbf{H}_{d_m} [\mathbf{H}_{d_m} \mathbf{H}_{d_m}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N]^{-1}. \quad (23)$$

O bloco de informação \mathbf{b}_m é então recuperado por meio de

$$\hat{\mathbf{b}}_m = \text{sgn}[\mathbf{Re}(\mathbf{E}_{m,MMSE} \mathbf{r}_m)]. \quad (24)$$

É importante ressaltar que como no caso SC DS-CDMA os sinais recebidos podem ser idealmente desacoplados na recepção, o equalizador MMSE de um dado usuário requer apenas o conhecimento (ou estimação) do canal deste usuário. No caso SC CDMA, como pode ser depreendido das expressões (14), (15) e (16) o equalizador MMSE requer o conhecimento dos canais (e códigos) de todos os usuários ativos no sistema.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados numéricos são apresentados para os sistemas SC CDMA e SC DS-CDMA com modulação BPSK e códigos ortogonais do tipo Hadamard de comprimento $T = 16$. Supõe-se que os canais associados aos K usuários ativos no sistema são aleatórios, estatisticamente independentes e modelados por um filtro invariante no tempo FIR. O filtro FIR é, neste caso, modelado com $P = 4$ coeficientes ou taps, com as componentes do canal do k -ésimo usuário, \mathbf{h}_k , dados por $h_{k_i} = p_i \alpha_{k_i}$, onde α_{k_i} , $i=0,1,\dots,P-1$, são variáveis aleatórias gaussianas complexas, estatisticamente independentes, com média nula e $\mathbb{E}[|\alpha_{k_i}|^2] = 1$. Os valores de α_{k_i} são sorteados no início de cada simulação e mantidos fixos ao longo de cada rodada, os pesos p_i satisfazem a $\sum_{i=0}^{P-1} |p_i|^2 = 1$, com os pesos $p_0 = 0,8671, p_1 = 0,4346, p_2 = 0,2178, p_3 = 0,1092$. A faixa de guarda do tipo CP é considerada suficientemente grande para anular a interferência entre blocos (IBI) ou seja $L \geq P$.

Nas comparações de desempenho considerou-se que os dois sistemas ocupam a mesma banda de transmissão e, portanto, o intervalo de tempo associado a um chip do bloco \mathbf{c}_k no SC CDMA (Figura 1) é igual ao intervalo de tempo associado a um símbolo do bloco \mathbf{b}_k do SC DS-CDMA (Figura 2). Considera-se também que os sistemas têm o mesmo *throughput* η , definido aqui como sendo a razão entre o tempo necessário para a transmissão de um dado bloco e o tempo necessário para a transmissão deste bloco acrescido da faixa de guarda. Tem-se, portanto, para o sistema SC CDMA que $\eta = 1/(1 + L/T)$, e para o caso SC DS-CDMA, $\eta = 1/(1 + L/N)$, onde L é o tamanho da faixa de guarda, T é o comprimento do código \mathbf{c}_k e N é o tamanho do bloco de informação \mathbf{b}_k . Assim, para que os sistemas tenham igual *throughput*, supôs-se que o sistema SC DS-CDMA opera com $N=T=16$. Os resultados foram computados após 4000 repetições de transmissões de $500 \times N$ símbolos de informação cada. A Figura 3 compara as curvas da taxa de erro de bit versus E_b/N_0 para os dois sistemas considerados, obtidas com equalizadores ZF e MMSE e 8

usuários ativos no sistema. Percebe-se a diferença pronunciada dos desempenhos resultantes dos dois tipos de equalização. É importante ressaltar também, que, diferentemente do sistema SC CDMA, devido a perfeita eliminação da IMA as curvas relativas ao caso SC DS-CDMA não variam com o número de usuários no sistema (até o limite máximo de 16). As curvas da Figura 3 indicam que com uma carga apenas moderada ($K/T = 1/2$) o sistema SC CDMA apresenta um desempenho significativamente inferior ao SC DS-CDMA no caso de equalização MMSE e apenas ligeiramente superior no caso ZF e somente para valores baixos da razão sinal-ruído. As Figuras 4 e 5 ilustram o comportamento do desempenho dos sistemas com o aumento da carga do sistema para valores de E_b/N_0 de 10 e 16 dB, respectivamente. Como esperado o desempenho manteve-se constante no caso SC DS-CDMA enquanto o sistema SC CDMA sofreu uma degradação crescente devida ao aumento da IMA. Destaca-se também a superioridade do SC DS-CDMA para qualquer valor da carga K/T do sistema no caso de equalização MMSE, enquanto que no caso ZF o SC CDMA apresenta superioridade apenas para valores relativamente baixos desta carga (menor que ou igual 37.5% para $E_b/N_0 = 10$ dB e 12.5% para $E_b/N_0 = 16$ dB).

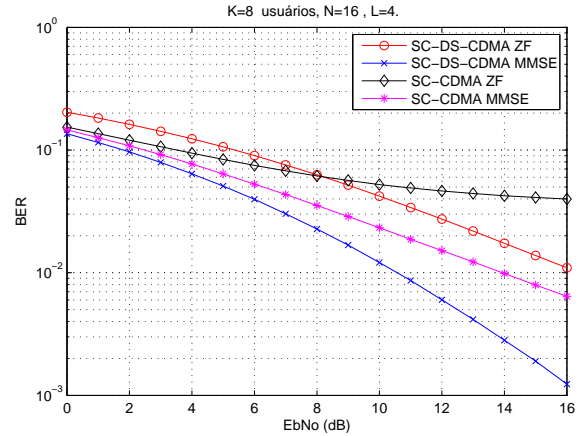


Fig. 3. BER versus E_b/N_0 para os sistemas SC CDMA e SC DS-CDMA

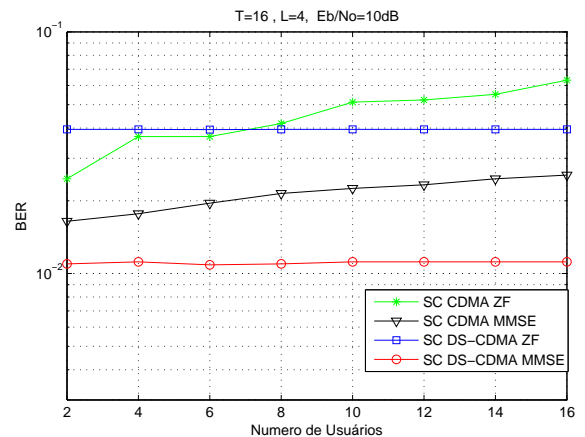


Fig. 4. BER versus Número de Usuários, Com $E_b/N_0 = 10$ dB para os sistemas SC CDMA e SC DS-CDMA

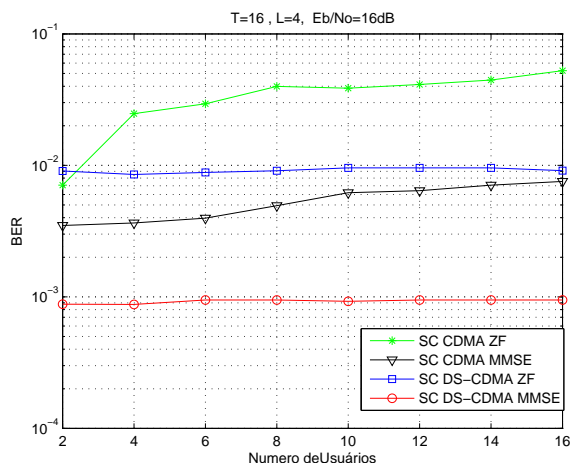


Fig. 5. BER versus Número de Usuários, Com $E_b/N_0 = 16dB$ para os sistemas SC CDMA e SC DS-CDMA

VI. CONCLUSÕES

Este artigo examinou uma nova possível combinação da transmissão em blocos com portadora única e a técnica de múltiplo acesso CDMA. Foi mostrado que esta nova técnica de transmissão permite que, diferentemente do que ocorre no sistema SC CDMA tradicional, os usuários sejam desacoplados na recepção mesmo quando a transmissão é feita em canais multipercurso seletivos na frequência. Como consequência, os procedimentos de recepção, tais como estimação de canal (não explorada aqui), equalização e detecção são realizados idealmente na ausência de IMA e demandam apenas o conhecimento do código e do canal do usuário de interesse. Além dessas vantagens, e muito devido a elas, os resultados de desempenho indicaram uma clara superioridade do sistema proposto sobre o sistema SC CDMA tradicional.

REFERÊNCIAS

- [1] Bernardo R. da Costa, Tiago T.V.Vinhoa, R. Sampaio-Neto e Rodrigo C.de Lamare, "Equalização Adaptativa no Domínio da Frequência para Sistemas com Transmissão em Blocos". Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'2007), Recife, setembro 2007
- [2] Fabian D. Backx, Tiago T.V. Vinhoa and R. Sampaio-Neto, "Power Techniques for Blind Channel Estimation in Zero-Padded OFDM Systems." Anais do IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007), Atenas, Grécia, setembro 2007.
- [3] Fabian D. Backx, Tiago T.V. Vinhoa and R.Sampaio-Neto, " Blind Channel Estimation for Zero-Padded OFDM Systems Based on Correlation Matching," Anais do IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2007), Baltimore, MD, USA, outubro 2007.
- [4] César A. Medina, Tiago T.V. Vinhoa and R. Sampaio-Neto, "Performance Comparison of Minimum Variance Single carrier and Multicarrier CDMA Receivers. " Proceedings do IEEE Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC 2007), Helsinki, Finlândia, junho 2007.
- [5] Deolinda Fontes Cardoso, Tiago T.V.Vinhoa e Raimundo Sampaio-Neto "Análise de Estimadores de Canal Assistidos para Sistemas CDMA com Múltiplas Portadoras." Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT'2007), Recife, setembro 2007.
- [6] Zhengdao Wang, and Georgios B. Giannakis "Wireless Multicarrier Communications: where Fourier Meets Shannon" IEEE Signal Processing Magazine, vol. 17, no. 3, may 2000.
- [7] A. Chouly, A. Brajal, and S. Jourdan, "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems," Proc. GLOBECOM, pp. 1723-1728, novembro 1993.
- [8] V. DaSilva and E. S. Sousa, "Performance of orthogonal CDMA codes for quasi-synchronous communication systems," Proc. ICUPC, pp. 995-999, outubro 1993.
- [9] K. L. Baum, T. A. Thomas, F. W. Vook, and V. Nangia, "Cyclic-prefix CDMA: an improved transmission method for broadband DS-CDMA cellular systems," Proc. WCNC, março 2002.
- [10] A. S. Madhukumar, F. Chin, Y.-C. Liang, and K. Yang, "Single-carrier cyclic prefix-assisted CDMA system with frequency domain equalization for high data rate transmission," EURASIP J. Wirel. Commun. Netw., vol. 2004, no. 1, pp. 149-160, 2004.
- [11] B. Muquet, Z. Wang, G.B Giannakis, M. de Courville, P. Duhamel, "Cyclic Prefixing or Zero Padding for Wireless Multicarrier Transmissions." IEEE Trans. Commun., vol. 12, no. 50, pp. 2136-2148, 2002.