

4

Chip-Spread CDMA com Transmissão em Blocos

Neste capítulo é apresentado o modelo matemático para uma nova possível combinação das técnicas de transmissão em blocos SC e OFDM e uma variação da técnica de múltiplo acesso CDMA aqui referida como CS-CDMA (*Chip-Spread CDMA*), apresentada na Seção 4.1. A seção 4.2 apresenta as expressões matemáticas da técnica CS-CDMA combinada com o esquema OFDM, aqui chamada MC CS-CDMA. A Seção 4.3 descreve a técnica CS-CDMA combinada com transmissões em uma única portadora, pelo esquema SC, aqui referida como SC CS-CDMA. Na seção 4.4 são apresentados os equalizadores ZF e MMSE no domínio da frequência, para as técnicas MC CD-CDMA e SC CS-CDMA, supondo conhecimento da resposta do canal na recepção. A seguir na Seção 4.5 resultados numéricos e comparações de desempenho dos sistemas são apresentadas.

4.1

CS-CDMA

O sistema CS-CDMA (*Chip-Spread Code Division Multiple Access*) aqui proposto, considera uma inversão entre os símbolos de informação e os chips do código de espalhamento nos blocos CDMA tradicionais que têm estrutura representada na Figura 3.2, onde o k -ésimo usuário transmite sequencialmente símbolos binários, com cada símbolo espalhado por uma sequência de código $\mathbf{c}_k$ de tamanho T , assim o bloco CDMA transmitido na i -ésima transmissão é dado por $\mathbf{c}_k b_k(i)$, ($i = 1, 2, \dots$). No sistema CS-CDMA, um bloco com N símbolos de

$c_{k,T-1}$	$\dots$	$\dots$	$c_{k,1}$	$c_{k,0}$
$\mathbf{b}_k$	$\dots$	$\dots$	$\mathbf{b}_k$	$\mathbf{b}_k$

Figura 4.1: Representação do bloco transmitido para o k -ésimo usuário no sistema CS-CDMA.

informação, $\mathbf{b}_k = [b_k(0), b_k(1), \dots, b_k(N)]^T$, é formado e substituído na estrutura da Figura 3.2, 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. Nesta nova estrutura de transmissão, representada na Figura 4.1, cada *chip* do código é espalhado pela sequência de símbolos, o que motivou o nome "*Chip-Spread*" adotado aqui. Assim, o bloco transmitido em um esquema SC CS-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 $\mathbf{c}_k$. Como será visto nas seções posteriores 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.

4.2

Sistema MC CS-CDMA

Neste sistema, o bloco CS-CDMA de tamanho N , na i -ésima transmissão do k -ésimo usuário, dado por $\mathbf{b}_k c_{k,i}$, é transmitido em OFDM, já que à cada bloco é aplicada uma IDFT, normalizada de N pontos. Dessa forma, os símbolos do bloco $\mathbf{b}_k c_{k,i}$ são transmitidos em N distintas portadoras. Após a adição do período de guarda, o símbolo OFDM resultante é transmitido através de um canal multipercurso. Observe-se que o sistema MC CS-CDMA coincide com a técnica conhecida na literatura como MC DS-CDMA [28, 29, 30], onde cada símbolo em um bloco de N símbolos de um dado usuário k é espalhado pela sequência de espalhamento $\mathbf{c}_k$ de T chips, como ilustrado na Figura 3.2. A seguir, os N símbolos espalhados são transmitidos *chip a chip* em N distintas portadoras. Assim a sub-portadora j ($j = 1, 2, \dots, N$) transmite sequencialmente os T chips do símbolo $b_k(j)$ o que motivou o nome MultiCarrier DS-CDMA (MC DS-CDMA). Na i -ésima transmissão ($i = 1, 2, \dots, T$), o chip transmitido por esta sub-portadora é $b_k(j)c_{k,i}$ e o bloco associado ao conjunto de N sub-portadoras na i -ésima transmissão de *chip* é portanto $\mathbf{b}_k c_{k,i}$. Ao longo das T transmissões o bloco recebido para MC CS-CDMA terá as mesmas características do bloco recebido MC DS-CDMA. Será aqui estudado o sistema MC CS-CDMA com faixas de guarda dos tipos CP (*Prefixo Cíclico*) e ZP (*Zero Padding*).

4.2.1

MC CS-CDMA com faixa de guarda CP

As expressões matemáticas relativas às transmissões em um esquema MC CS-CDMA, podem ser obtidas daquelas referentes ao sistema MC-CDMA do Capítulo 3, substituindo-se, o bloco CDMA $\mathbf{c}_k b_k(i)$ pelo bloco CS-CDMA $\mathbf{b}_k c_{k,i}$. Assim, por analogia com a equação (3-3) o bloco recebido MC CS-CDMA com faixa de guarda CP fica

$$\mathbf{r}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{c_k}(i) \mathbf{W}_N^H \mathbf{b}_k c_{k,i} + \mathbf{n}_N(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-1)$$

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

4.2.2

MC CS-CDMA com faixa de guarda ZP

Para o caso de transmissões com faixa de guarda ZP, inserida no sinal a se transmitir, pela premultiplicação da matriz $\mathbf{G}_{zp}$ definida em (2-6), a substituição do bloco CDMA pelo bloco CS-CDMA, na equação (3-4) fornece o bloco MC CS-CDMA com faixa de guarda ZP:

$$\mathbf{r}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k(i) \mathbf{G}_{zp} \mathbf{b}_k c_{k,i} + \mathbf{n}_M(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-2)$$

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

4.3

Sistema SC CS-CDMA

Considera-se aqui que a i -ésima transmissão do bloco CS-CDMA, para o k -ésimo usuário $\mathbf{b}_k c_{k,i}$, é feita em uma única portadora com o esquema SC (*Single Carrier*), considera-se também um canal de subida (*up-link*) com K usuários ativos no sistema, uma faixa de guarda é inserida antes da transmissão do bloco para eliminar a interferência entre blocos sucessivos. A seguir são apresentadas a modelagem matemática para o sistema SC CS-CDMA com as faixas de guarda CP (*Prefixo Cíclico*) e ZP (*Zero Padding*).

4.3.1

SC CS-CDMA com faixa de guarda CP

Após a inserção da faixa de guarda CP de tamanho L no bloco $\mathbf{b}_{kC_{k,i}}$, os elementos do bloco resultante de tamanho $N+L$ são transmitidos em portadora única, através do canal multipercurso. Na estação rádio base, o prefixo cíclico é removido do bloco recebido. Assim, substituindo-se em (3-1) o bloco CDMA pelo bloco CS-CDMA, tem-se que o sinal recebido SC CS-CDMA com faixa de guarda CP na estação rádio base é da forma:

$$\mathbf{r}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{c_k}(i) \mathbf{b}_{kC_{k,i}} + \mathbf{n}_N(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-3)$$

onde $\mathbf{n}_N(i)$ representa o vetor de ruído gaussiano branco de média nula e matriz covariância $\mathbf{K}_{\mathbf{n}_N} = \sigma^2 \mathbf{I}_N$.

4.3.2

SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP

A faixa de guarda ZP, é inserida com a pré-multiplicação da matriz $\mathbf{G}_{zp}$ no bloco $\mathbf{b}_{kC_{k,i}}$, o bloco é transmitido em portadora única. O bloco recebido SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP, é obtido da equação (3-2), com a substituição apropriada dos blocos, obtendo-se

$$\mathbf{r}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k(i) \mathbf{G}_{zp} \mathbf{b}_{kC_{k,i}} + \mathbf{n}_M(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-4)$$

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

4.4

Equalização no domínio da frequência FDE

O bloco recebido CS-CDMA, é transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência, por meio de uma DFT (Trasformada Discreta de Fourier) normalizada aplicada ao bloco $\mathbf{r}(i)$, visando com isso uma redução na complexidade dos equalizadores. São observados os equalizadores ZF (*Zero Forcing*) e MMSE (*Minimun Mean Squared Error*), onde em ambos supõe-se conhecimento ideal dos canais de transmissão. Admite-se ainda que o canal não varia durante a transmissão dos T chips do bloco da Figura 4.1. Ou seja $\mathbf{H}_{d_k}(i) = \mathbf{H}_{d_k}; \quad i = 0, 1 \dots T-1$.

4.4.1

SC CS-CDMA com FDE e faixa de guarda CP

O sinal recebido no domínio da frequência para SC CS-CDMA com faixa de guarda CP, é obtido da equação (3-6), trocando o bloco CDMA $\mathbf{c}_k b(i)$ pelo bloco CS-CDMA $\mathbf{b}_k c_{k,i}$. O sinal é da forma

$$\tilde{\mathbf{r}}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{W}_N \mathbf{b}_k c_{k,i} + \tilde{\mathbf{n}}_N(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-5)$$

onde o vetor $\tilde{\mathbf{n}}_N(i)$ é gaussiano de media nula e matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_N} = \sigma^2 \mathbf{I}_N$. Coletando-se os sinais recebidos no domínio da frequência associados aos T chips, obtém-se uma matriz de dimensão $N \times T$, que pode ser expressa da forma

$$\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{\mathbf{r}}_{CP}(0) \dots \tilde{\mathbf{r}}_{CP}(T-1)] = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{W}_N \mathbf{b}_k \mathbf{c}_k^T + \tilde{\mathbf{N}}, \quad (4-6)$$

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

Da equação (4-6) pode ser visto a vantagem da técnica SC CS-CDMA aqui proposta, que a ortogonalidade entre os códigos dos usuários é mantida na recepção 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

$$\tilde{\mathbf{r}}_m = \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{c}_m = \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_N \mathbf{b}_m + \tilde{\mathbf{n}}_f, \quad (4-7)$$

onde $\tilde{\mathbf{n}}_f = \tilde{\mathbf{N}} \mathbf{c}_m$ continua sendo um vetor de ruído gaussiano branco, de média nula e matriz covariância $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{n}}_f} = \sigma^2 \mathbf{I}_N$. Ressalte-se que o sinal em (4-7) corresponde a um sinal SC-CP com um único usuário como em (2-35), e portanto não possui componentes de IMA. Assim, o desempenho de um sistema SC CS-CDMA com faixa de guarda CP é igual ao desempenho de um sistema monousuário SC-CP.

FDE-ZF

O equalizador ZF elimina a interferência entre símbolos do componente do sinal em (4-7) através da multiplicação de $\tilde{\mathbf{r}}_m$ pela matriz definida em (2-38)

$$\tilde{\mathbf{E}}_{zf,cp}^m = [\tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_N]^{-1} = \mathbf{W}_N^H \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{-1}. \quad (4-8)$$

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

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{b}}_m &= \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{zf,cp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)] \\ &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{b}_m + \mathbf{n}_w)],\end{aligned}\quad (4-9)$$

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

FDE-MMSE

O equalizador MMSE é dado pela matriz $N \times N$ obtida minimizando-se a função custo, definida em (2-51), do sinal recebido no domínio da frequência em (4-7)

$$\mathbf{J} = \mathbb{E}[\|\mathbf{b}_m - \tilde{\mathbf{E}}_{mmse,cp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m\|^2], \quad (4-10)$$

cujas solução é

$$\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,cp}^m = \mathbf{W}_N^H \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^H [\tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_N]^{-1}. \quad (4-11)$$

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

$$\hat{\mathbf{b}}_m = \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,cp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)]. \quad (4-12)$$

É importante ressaltar que como no caso SC CS-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 (3-11) e (3-12), o equalizador MMSE requer o conhecimento dos canais (e códigos) de todos os usuários ativos no sistema.

4.4.2

SC CS-CDMA com FDE e faixa de guarda ZP

Para o caso de transmissões com faixa de guarda ZP o sinal recebido no domínio da frequência para SC CS-CDMA, é obtido de (3-15), trocando o bloco CDMA $\mathbf{c}_k b(i)$ pelo bloco CS-CDMA $\mathbf{b}_{kCk,i}$, assim

$$\tilde{\mathbf{r}}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{b}_{kCk,i} + \tilde{\mathbf{n}}_M(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1. \quad (4-13)$$

Coletando-se os sinais recebidos no domínio da frequência associados aos chips, obtém-se

$$\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{\mathbf{r}}_{ZP}(0) \dots \tilde{\mathbf{r}}_{ZP}(T-1)] = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{b}_k \mathbf{c}_k^T + \tilde{\mathbf{N}}, \quad (4-14)$$

onde $\tilde{\mathbf{R}}$ é uma matriz de dimensão $M \times T$ e $\tilde{\mathbf{N}} = [\tilde{\mathbf{n}}_M(0) \dots \tilde{\mathbf{n}}_M(T-1)]$.

Dado que a ortogonalidade entre os códigos dos usuários é mantida, o sinal a ser equalizado correspondente ao m -ésimo usuário é obtido por

$$\tilde{\mathbf{r}}_m = \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{c}_m = \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{b}_m + \tilde{\mathbf{n}}_f, \quad (4-15)$$

O sinal em (4-15) corresponde a um sinal SC-ZP com um único usuário como em (2-46) e portanto, não possui componentes de IMA. Assim, o desempenho de um sistema SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP é igual ao desempenho de um sistema monousuário SC-ZP.

FDE-ZF

O equalizador ZF para transmissões com faixa de guarda ZP é obtido da equação (2-48) sendo a pseudo-inversa da matriz de dimensão $M \times N$ que pré-multiplica o bloco de informação $\mathbf{b}_m$, ou seja

$$\tilde{\mathbf{E}}_{zf,zp}^m = [\mathbf{W}_{MN}^H \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^H \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_{MN}]^{-1} \mathbf{W}_{MN}^H \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^H. \quad (4-16)$$

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

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{b}}_m &= \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{zf,zp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)] \\ &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{b}_m + \mathbf{n}_w)], \end{aligned} \quad (4-17)$$

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

FDE-MMSE

O equalizador MMSE para SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP, é obtido aplicando a função custo definida em (4-10) ao sinal recebido no domínio da frequência do m -ésimo usuário em (4-15). Assim, por analogia com (2-52) e (2-53) obtém-se o equalizador MMSE:

$$\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,zp}^m = \mathbf{W}_{MN}^H \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^H \left[\frac{N}{M} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^H + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right]^{-1}. \quad (4-18)$$

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

$$\hat{\mathbf{b}}_m = \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,zp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)]. \quad (4-19)$$

Observe-se que o equalizador MMSE para SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP requer o conhecimento apenas do canal de usuário de interesse, uma vez que os sinais são idealmente desacoplados na recepção.

4.4.3

MC CS-CDMA com FDE e faixa de guarda CP

O sinal recebido MC CS-CDMA com faixa de guarda CP no domínio da frequência é calculado da equação (3-22) trocando o bloco CDMA $\mathbf{c}_k b(i)$ pelo bloco CS-CDMA $\mathbf{b}_k c_{k,i}$, tem-se assim

$$\tilde{\mathbf{r}}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{b}_k c_{k,i} + \tilde{\mathbf{n}}_N(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-20)$$

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

Coletando-se os sinais associados aos T chips, obtêm-se a matriz de dimensão $N \times T$

$$\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{\mathbf{r}}_{CP}(0) \dots \tilde{\mathbf{r}}_{CP}(T-1)] = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{b}_k \mathbf{c}_k^T + \tilde{\mathbf{N}}, \quad (4-21)$$

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

O sinal a ser equalizado correspondente ao m -ésimo é obtido por

$$\tilde{\mathbf{r}}_m = \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{c}_m = \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{b}_m + \tilde{\mathbf{n}}_f, \quad (4-22)$$

onde $\mathbf{n}_f = \tilde{\mathbf{N}} \mathbf{c}_m$ é um vetor de ruído gaussiano branco, de média nula e matriz covariância $\mathbf{K}_{\mathbf{n}_f} = \|\mathbf{c}_m\|^2 \sigma^2 \mathbf{I}_N = \sigma^2 \mathbf{I}_N$. Ressalte-se que o sinal em (4-22) corresponde a um sinal OFDM-CP com um único usuário em (2-55), assim o desempenho de um sistema MC CS-CDMA com faixa de guarda CP é igual ao desempenho de um sistema monousuário OFDM-CP.

FDE-ZF

O equalizador ZF obtido da equação (2-56) é a inversa da matriz que pré-multiplica o vetor de dados $\mathbf{b}_m$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{zf,cp}^m = \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{-1}. \quad (4-23)$$

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

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{b}}_m &= \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{zf,cp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)] \\ &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{b}_m + \mathbf{n}_w)], \end{aligned} \quad (4-24)$$

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

FDE-MMSE

O equalizador MMSE é calculado da função custo definida em (4-10) aplicada ao bloco $\mathbf{r}_m$ em (4-22).

Assim por analogia com a equação (2-59) temos

$$\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,cp}^m = \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{\mathcal{H}} [\tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{\mathcal{H}} + \sigma^2 \mathbf{I}_N]^{-1}. \quad (4-25)$$

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

$$\hat{\mathbf{b}}_m = \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,cp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)]. \quad (4-26)$$

Neste caso o equalizador MMSE requer apenas o conhecimento do canal do usuário de interesse.

4.4.4**MC CS-CDMA com FDE e faixa de guarda ZP**

O sinal recebido MC CS-CDMA com faixa de guarda ZP no domínio da frequência é obtido de (3-30) trocando o bloco CDMA $\mathbf{c}_k b(i)$ pelo bloco CS-CDMA $\mathbf{b}_{kCk,i}$, obtêm-se assim

$$\tilde{\mathbf{r}}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{W}_N^{\mathcal{H}} \mathbf{b}_{kCk,i} + \tilde{\mathbf{n}}_M(i), \quad i = 0, 1 \dots T-1, \quad (4-27)$$

Coletando-se os sinais associados aos T chips, obtêm-se a matriz de dimensão $M \times T$

$$\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{\mathbf{r}}_{ZP}(0) \dots \tilde{\mathbf{r}}_{ZP}(T-1)] = \sum_{k=1}^K \tilde{\mathbf{H}}_{d_k} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{W}_N^{\mathcal{H}} \mathbf{b}_k \mathbf{c}_k^T + \tilde{\mathbf{N}} \quad (4-28)$$

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

O sinal a ser equalizado correspondente ao m -ésimo é então obtido por

$$\tilde{\mathbf{r}}_m = \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{c}_m = \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{W}_N^{\mathcal{H}} \mathbf{b}_m + \tilde{\mathbf{n}}_f, \quad (4-29)$$

O sinal em (4-29) corresponde a um sinal OFDM-ZP com um único usuário em (2-61), assim o desempenho de um sistema MC CS-CDMA com faixa de guarda ZP é igual ao desempenho de um sistema monousuário OFDM-ZP.

FDE-ZF

O equalizador ZF para transmissões com faixa de guarda ZP obtido da equação (2-62) é a pseudo-inversa da matriz de dimensão $M \times N$ que pré-multiplica o bloco de informação $\mathbf{b}_m$, ou seja

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{E}}_{zf,zp}^m &= [\tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{W}_N^{\mathcal{H}}]^\dagger \\ &= [\mathbf{W}_N \mathbf{W}_{MN}^{\mathcal{H}} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{\mathcal{H}} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \mathbf{W}_{MN} \mathbf{W}_N^{\mathcal{H}}]^{-1} \mathbf{W}_N \mathbf{W}_{MN}^{\mathcal{H}} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{\mathcal{H}}. \end{aligned} \quad (4-30)$$

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

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{b}}_m &= \text{sgn}[\text{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{zf,zp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)] \\ &= \text{sgn}[\text{Re}(\mathbf{b}_m + \mathbf{n}_w)], \end{aligned} \quad (4-31)$$

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

FDE-MMSE

O equalizador MMSE é calculado da função custo em (4-10) aplicada ao bloco $\mathbf{r}_m$ em (4-29). Assim, por analogia com a equação (2-65) e (2-66) temos

$$\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,zp}^m = \frac{M}{N} \mathbf{W}_N \mathbf{W}_{MN}^{\mathcal{H}} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{\mathcal{H}} [\tilde{\mathbf{H}}_{d_m} \tilde{\mathbf{H}}_{d_m}^{\mathcal{H}} + \frac{M}{N} \sigma^2 \mathbf{I}_M]^{-1}. \quad (4-32)$$

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

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{b}}_m &= \text{sgn}[\mathbf{Re}(\tilde{\mathbf{E}}_{mmse,zp}^m \tilde{\mathbf{r}}_m)] \\ &= \text{sgn}[\mathbf{Re}(\mathbf{b}_m + \mathbf{n}_w)],\end{aligned}\quad (4-33)$$

dado que os sinais são idealmente desacoplados na recepção, o equalizador MMSE só precisa conhecer o canal do usuário de interesse.

4.5

Resultados Numéricos

Os resultados numéricos nesta seção são apresentados para os sistemas SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com modulação BPSK e códigos ortogonais do tipo Hadamard de tamanho $T=16$, supondo K usuários ativos nos sistemas. Os canais associados aos usuários são aleatórios 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 $p_0 = 0,8671$, $p_1 = 0,4346$, $p_2 = 0,2178$, $p_3 = 0,1092$ [22]. Dado que no sistema SC-CDMA, é possível a eliminação da IMA, as curvas do desempenho para SC CS-CDMA e MC CS-CDMA, terão as mesmas características que as curvas dos sistemas SC e OFDM tradicionais, respectivamente. A Figura 4.2 compara as curvas da taxa de erro de bit versus E_b/N_0 para o sistema SC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP, obtidas com equalizadores ZF e MMSE, para uma carga de até 16 usuários ativos no sistema. Percebe-se a superioridade no desempenho para o sistema SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP sobre o sistema SC CS-CDMA com faixa de guarda CP, observe-se também a superioridade em ambos sistemas, quando operam com um equalizador MMSE. A Figura 4.3 compara as curvas da taxa de erro de bit versus E_b/N_0 para o sistema MC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP, obtidas com equalizadores ZF e MMSE, para uma carga de até 16 usuários ativos no sistema. Percebe-se a superioridade no desempenho quando o sistema opera com faixa de guarda ZP e a coincidência entre as curvas para os equalizadores ZF e MMSE, quando o sistema opera com faixa de guarda CP. As curvas de desempenho para MC CS-CDMA tem as mesmas características que o sistema

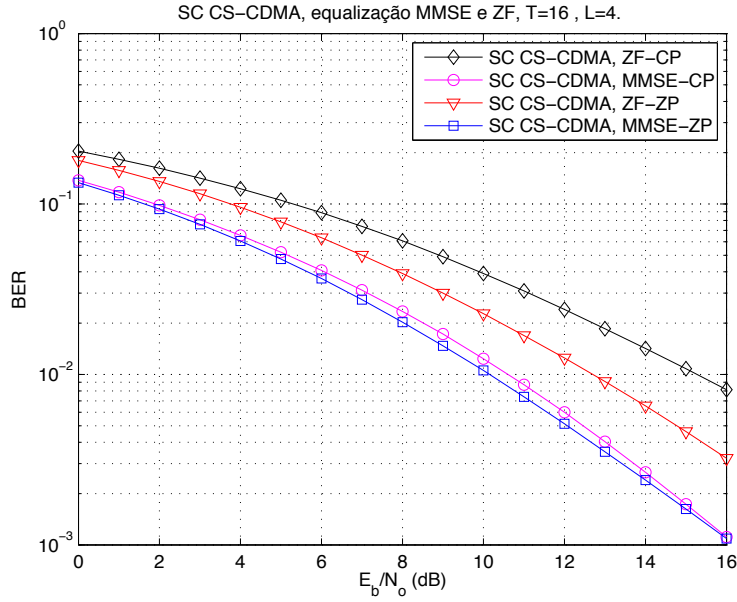


Figura 4.2: BER versus E_b/N_0 para o sistema SC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP (Número de usuários $K \leq 16$).

OFDM tradicional. A Figura 4.4 compara as curvas da taxa de erro de bit versus E_b/N_0 para os dois sistemas considerados neste capítulo, SC CS-CDMA e MC CS-CMDA, com uma carga de até 16 usuários e equalização ZF. A Figura 4.5 compara as curvas da taxa de erro de bit versus E_b/N_0 para os sistemas SC CS-CDMA e MC CS-CMDA, com uma carga de até 16 usuários e equalização MMSE.

No Apêndice A, são apresentadas figuras que mostram os desempenhos dos sistemas estudados neste Capítulo, considerando que a carga (número de usuários) dos sistemas é aumentada.

4.6

Considerações Finais

Foi mostrado que a técnica de transmissão CS-CDMA combinada com as técnicas SC e OFDM, permite que os usuários sejam desacoplados na recepção mesmo quando a transmissão é feita em canais multipercurso seletivos na frequência, como consequência os procedimentos de detecção podem ser realizados idealmente em ausência da IMA. Devido a esta característica o desempenho dos sistemas SC CS-CDMA e MC CS-CDMA, são idênticas aos dos sistemas monousuários SC e OFDM tradicionais, respectivamente.

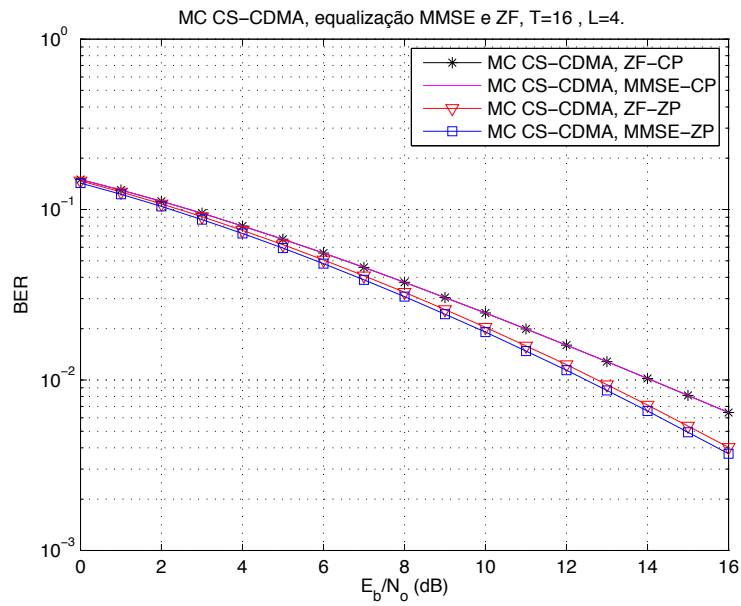


Figura 4.3: BER versus E_b/N_0 para o sistema MC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP (Número de usuários $K \leq 16$).

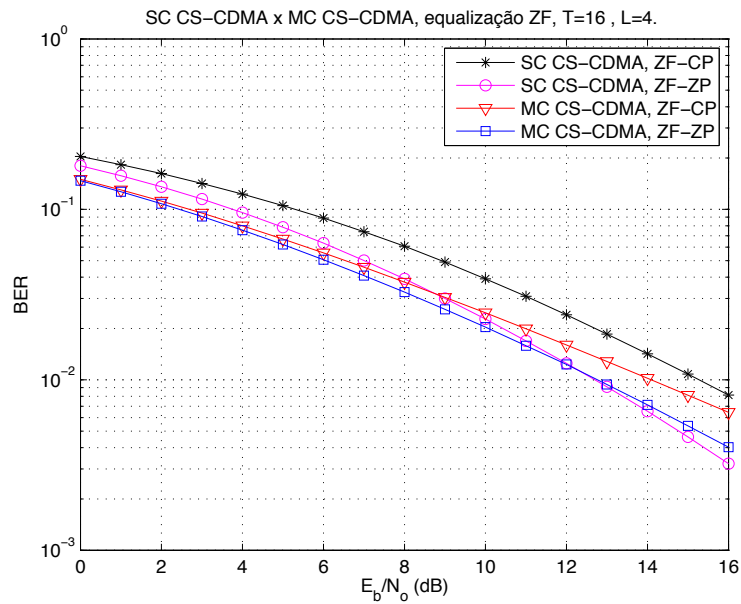


Figura 4.4: BER versus E_b/N_0 para os sistema SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com equalização ZF (Número de usuários $K \leq 16$).

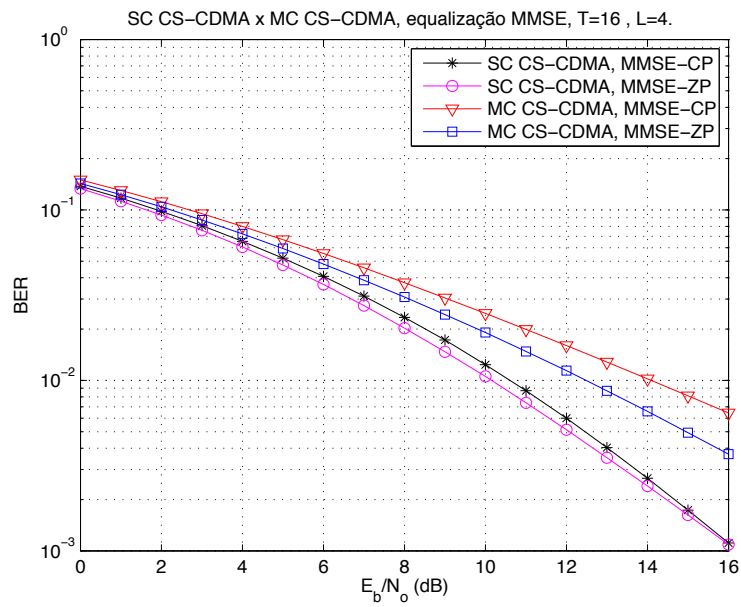


Figura 4.5: BER versus E_b/N_0 para os sistemas SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com equalização MMSE (Número de usuários $K \leq 16$).