

Comparação de Sequências de Espalhamento Aplicáveis a Sistemas QS-CDMA

Comparison of Spreading Sequences Applied to QS-CDMA Systems

André S. R. Kuramoto¹; Taufik Abrão²; Paul Jean E. Jeszensky³

Resumo

Neste trabalho são comparadas características dos conjuntos de seqüências de espalhamento Walsh-Hadamard, seqüências QS, PN Ótima, PS e SP. A comparação é realizada pela análise das propriedades de correlação e o desempenho do receptor convencional. Cada um dos conjuntos de seqüências em canal AWGN utiliza carregamentos similares e condição de quase sincronismo.

Palavras Chaves: DS/CDMA Quase-Síncronos, Seqüências de Espalhamento, propriedade de correlação

Abstract

In this work Walsh-Hadamard, QS-Sequence, Optimal PN, PS and SP spreading sequences' characteristics are compared. The comparison is accomplished analyzing the correlation properties and performance of conventional receiver using each one of the sequences in AWGN channels and loads of similar systems in quasi-synchronous condition.

Key Words: Quasi-Synchronous Direct; Sequence Code Division Multiple Access, Spreading Sequences, correlation properties.

Introdução

O acesso múltiplo por divisão de código de seqüência direta (DS/CDMA - *Direct Sequence/Code-Division Multiple Access*) é a técnica de multiplexação em que mais de um usuário utiliza um canal de comunicação simultaneamente, modulando seus sinais por suas respectivas seqüências de espalhamento. No receptor, o sinal original de um

determinado usuário é detectado correlacionando-se o sinal recebido com a correspondente seqüência de espalhamento. Os sinais dos demais usuários não são demodulados, porém, a interferência de múltiplo acesso (MAI - *Multiple Access Interference*) será determinada pelos valores de correlação cruzada entre o usuário de interesse e os interferentes. A limitação de desempenho nos sistemas CDMA é re-

¹Aluno de mestrado (área de Telecomunicações) na Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da USP - São Paulo

²Graduado, mestre e doutor em Engenharia Elétrica em 1992, 1996 e 2001, respectivamente, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina, PR. E-mail: taufik@uel.br

³Professor associado do Depto de Telecomunicações e Controle (PTC) da Escola Politécnica da USP.

sultado principalmente da MAI, devido ao fato de múltiplos usuários estarem dividindo a mesma faixa de frequência. Esta interferência é resultado dos atrasos aleatórios t entre os sinais dos usuários ativos, tornando impossível a manutenção da ortogonalidade entre todas as formas de onda de códigos de espalhamento. A interferência MAI torna-se substancial quando o número de usuários cresce e/ou quando as disparidades de potência entre usuários ativos tornam-se significativas. A esta relação de potência do sinal do usuário de interesse com os demais é chamada razão *near-far* (NFR). A MAI pode ser controlada por meio da escolha adequada de seqüências de espalhamento e através do controle de potência de todos os sinais recebidos dos usuários ativos no sistema, de forma a manter as potências recebidas as mais equilibradas possíveis.

O sistema considerado neste trabalho é o CDMA Quase-Síncrono, QS-CDMA (*Quasi-Synchronous Code-Division Multiple Access*). Devido à impossibilidade desse sistema sincronizar perfeitamente os sinais recebidos de todos os usuários ativos, os atrasos entre estes sinais estarão distribuídos, de forma independente e uniforme, sobre o intervalo $[0, t_{máx}]$; $t_{máx}$ representa o erro máximo de sincronismo inerente ao sistema. Dessa forma, no QS-CDMA todas as seqüências de espalhamento estarão quase sincronizadas e portanto a MAI pode ser substancialmente reduzida escolhendo-se conjuntos de seqüências adequados com boas propriedades de correlação.

Na maioria dos trabalhos publicados na literatura especializada, tem-se investigado apenas as propriedades de correlação cruzada par das seqüências (ECC). Entretanto, para uma análise completa do desempenho de sistemas DS/CDMA, devemos considerar não somente as propriedades de correlação cruzada par, mas também as propriedades de correlação cruzada ímpar das seqüências (OCC) (PARK et al., 2000a; PURSLEY, 1977).

A função de OCC afeta a saída do filtro casado, quando o símbolo de informação muda dentro do intervalo de integração, enquanto a função ECC afeta

a saída quando o símbolo de informação não muda. Admitindo-se como razoável a hipótese de que os símbolos de informação sejam equiprováveis, a influência da OCC é tão importante quanto a ECC na determinação da MAI e do desempenho do sistema CDMA. Portanto, é razoável investigar as propriedades tanto da ECC quanto da OCC.

Neste trabalho, foram comparados os desempenhos de sistemas DS/CDMA quase-síncronos com detecção convencional em canal com ruído branco aditivo Gaussiano (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*) utilizando conjuntos de seqüências de espalhamento Walsh-Hadamard, seqüências QS (KUNO et al., 1994; SAITO et al., 2001), PN Ótima (LIN; CHANG, 1997), PS (PARK et al., 2000a) e SP (PARK et al., 2000b), com carregamentos semelhantes. Inicialmente, a seção 2 trata das definições utilizadas nas seções seguintes. Na seção 3 são verificadas as principais propriedades dos conjuntos de seqüências acima mencionados e estes comparados na seção 4. O modelo do sistema adotado para a avaliação do desempenho obtido com cada um dos conjuntos de seqüências de espalhamento é descrito na seção 5. A seção 6 descreve os parâmetros de simulação do sistema e os resultados de simulação Monte Carlo sintetizados na seção 7. Finalmente, as principais conclusões deste estudo estão indicadas na seção 8.

Definições

As seqüências c_i , são compostas de elementos complexos com módulo unitário:

$$c_i = \{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N}\} \quad (1)$$

onde i representa a i -ésima seqüência do conjunto; N o comprimento da seqüência de espalhamento; e $c_{i,j}$ é chamado chip.

A razão entre o período do símbolo de informação T_b e o período de chip T_c é chamada de ganho de processamento $G = T_b/T_c$. Neste trabalho, têm-se todos os chips de uma seqüência de espalhamento, designada a um determinado usuário, espalhando

cada um de seus símbolos de informação; desta forma o ganho de processamento é igual a N .

O carregamento do sistema $L = \frac{K_u}{N}$ relaciona o número de usuários ativos K_u no sistema com comprimento das seqüências N utilizadas.

Define-se função de autocorrelação par (ou periódica) (EAC) como:

$$R_{i,i} = \begin{cases} C_{i,i}(\mathbf{t}) + C_{i,i}^*(N - \mathbf{t}), & 0 \leq \mathbf{t} < N \\ C_{i,i}(\mathbf{t}) + C_{i,i}^*(-N - \mathbf{t}), & -N < \mathbf{t} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

função de correlação cruzada par (ECC) como:

$$R_{i,j} = \begin{cases} C_{i,j}(\mathbf{t}) + C_{j,i}^*(N - \mathbf{t}), & 0 \leq \mathbf{t} < N \\ C_{i,j}(\mathbf{t}) + C_{j,i}^*(-N - \mathbf{t}), & -N < \mathbf{t} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

e função de correlação cruzada ímpar (OCC) como:

$$\hat{R}_{i,j} = \begin{cases} C_{i,j}(\mathbf{t}) - C_{j,i}^*(N - \mathbf{t}), & 0 \leq \mathbf{t} < N \\ C_{i,j}(\mathbf{t}) - C_{j,i}^*(-N - \mathbf{t}), & -N < \mathbf{t} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

onde

$$C_{i,j}(\mathbf{t}) = \begin{cases} \sum_{l=1}^{N-t} c_{k_i} c_{k_j, l+t}^* & 0 \leq \mathbf{t} < N \\ \sum_{l=1}^{N+t} c_{k_i, l-t} c_{k_j, l}^* & -N < \mathbf{t} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

com $i \neq j$; \mathbf{t} representa o atraso entre as seqüências de espalhamento dado em unidades de tempo de chip T_c ; o operador $*$ denota complexo conjugado.

Seqüências de Espalhamento

Nesta seção são descritas as principais propriedades dos conjuntos de seqüências de espalhamento Walsh-Hadamard, seqüências QS, PN Ótima, PS, e SP.

Walsh-Hadamard

O conjunto Walsh-Hadamard (WH) pode ser construído tomando-se as linhas da matriz H_N :

$$H_N = \begin{pmatrix} H_{N-1} & H_{N-1} \\ H_{N-1} & -H_{N-1} \end{pmatrix} \quad H_0 = [1] \quad (6)$$

$$\mathbf{c}_i = \{h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,N}\} \quad (7)$$

onde \mathbf{c}_i representa a i -ésima seqüência do conjunto WH composto de elementos h_i bipolarizados $\{+1, -1\}$ da i -ésima linha da matriz H_N . O carregamento máximo do sistema que utiliza esse conjunto é $L_{máx} = 100\%$, pois H_N é uma matriz quadrada.

A função ECC para este conjunto assume valor zero quando $\mathbf{t} = 0$, pois quaisquer duas linhas ou colunas de H_N são ortogonais. Isso implica que, em um sistema CDMA síncrono (S-CDMA) com seqüências de espalhamento WH em canal AWGN, a interferência interusuários é zero. No entanto, quando $\mathbf{t} \neq 0$, as funções ECC, figura 1 (a), e OCC podem assumir valores elevados, o que implica em alta interferência interusuários em um sistema CDMA assíncrono (A-CDMA). A figura 1 (a) exemplifica a ocorrência de valores elevados em função do atraso para a ECC entre duas seqüências do conjunto WH com $N = 32$.

A função de EAC da WH apresenta picos quando $\mathbf{t} \neq 0$, como mostra a figura 1 (b). Se, neste caso, o sistema tolerar um erro de sincronismo máximo $\mathbf{t}_{máx} \geq 1T_c$, ocorrerão problemas na etapa de sincronismo, inviabilizando a recuperação da informação. Esse tipo de problema é contornado com a utilização de seqüências com boas propriedades de autocorrelação na etapa de sincronismo.

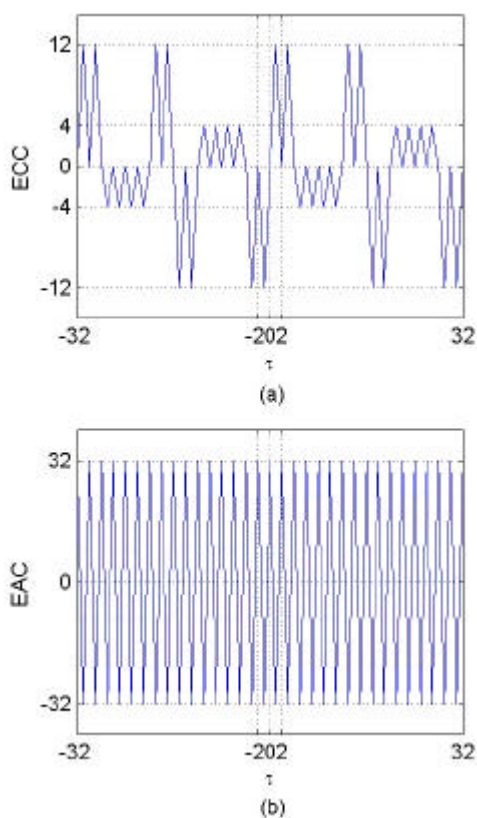


Figura 1. (a) Função de ECC das seqüências c_{29} e c_{30} do conjunto WH, com $N = 32$; (b) função de EAC da seqüência c_2 do conjunto WH, $N = 32$.

Seqüências QS

Os conjuntos de seqüências QS (KUNO et al., 1994; SAITO et al., 2001) são compostos de seqüências de Gold, com fases adequadamente escolhidas resultando em ECC mínima para pequenos atrasos t . Em (KUNO et al., 1994), foi mostrado que a distribuição da OCC é semelhante a uma distribuição Gaussiana, cuja variância torna-se mínima quando o valor para ECC também for mínimo (-1). Portanto, para o conjunto de seqüências de Gold, na condição de quase-sincronismo (QS), é razoável ajustar suas fases de acordo com a função ECC.

Em Saito et al. (2001), para conjuntos de seqüências QS, definiu-se a condição de quase-ortogonalidade em uma faixa t (QOQS(r)), resultando em valores de ECC:

Isto implica que seqüências do conjunto QS resultam em valores mínimos de ECC, isto é, o menor valor de ECC assumido pelas seqüências pertencen-

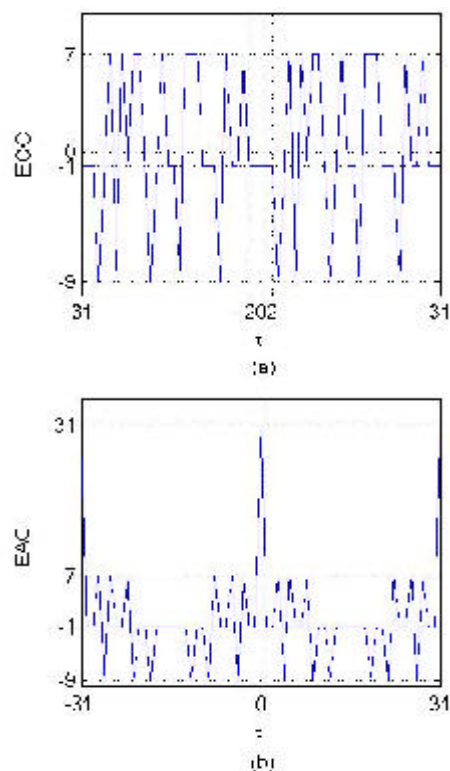


Figura 2. (a) Função de ECC de seqüências QS com propriedade QOQS(5) e $N = 31$; (b) função de EAC de seqüências QS com $N = 31$.

$$R_{i,j}(t) = -1 \text{ para } t = 0, \pm 1, \dots, \pm \frac{r-1}{2} \quad (8)$$

tes a um conjunto Gold, para atrasos de até $\frac{r-1}{2}T_c$, como ilustra a figura 2 (a).

Como o conjunto de seqüências QS é composto por seqüências de Gold, os valores de ECC e EAC para este conjunto de comprimento $N = 2^n - 1$, com n ímpar e par ($\neq 0 \pmod{4}$) são: -1 , $2^{(n+1)/2} - 1$, e $-2^{(n+1)/2} - 1$. Quando as seqüências estão em fase, a função EAC assume valor N , o que é desejável para a etapa de sincronismo. A figura 2 (b), como exemplo, mostra valores assumidos pela função EAC para uma seqüência do conjunto de Gold, $N = 31$.

O número de seqüências em um conjunto com propriedades QOQS(r) varia com o comprimento N das seqüências. Em Saito et al. (2001) foi investigado o tamanho e a quantidade de conjuntos de seqüências QS para $N = 7, 31, 127, 511$; esses resultados estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Tamanho do conjunto de seqüências QS de acordo com r e N .

r	N	número de conjuntos	tamanho do conjunto
3	7	2	2
	31	2	8
	127	2	32
	511	2	128
5	31	2	4
	127	4	8
7	511	4	32
	127	4	4
7	511	8	8
	127	2	4
	511	8	4

Nos conjuntos de seqüências QS de mesmo N , r e tamanho, podem ser obtidas propriedades de OCC diferentes. Por exemplo, para $N = 31$ e $r = 5$ existem 2 conjuntos, Q_1 e Q_4 , com 4 seqüências cada, extraídas do conjunto Gold $G(45,73)$ ⁴. A distribuição dos valores de OCC para esses dois conjuntos é exposto na figura 3. Verifica-se a maior ocorrência de valores de OCC de maior magnitude no conjunto Q_1 em relação ao conjunto Q_4 com o erro máximo de sincronismo $t_{máx} = 1T_c$ e também $t_{máx} = 2T_c$. Portanto, o receptor convencional utilizando o conjunto Q_4 terá melhor desempenho comparado ao receptor utilizando o conjunto Q_1 com $t_{máx} = 1T_c$ ou $t_{máx} = 2T_c$, como será mostrado na seção 6.

PN Ótima

O conjunto PN Ótima, proposto em (LIN; CHANG, 1997), é composto de seqüências balanceadas⁵ que resultam em baixos valores de ECC para uma determinada faixa t . Essa nova classe de se-

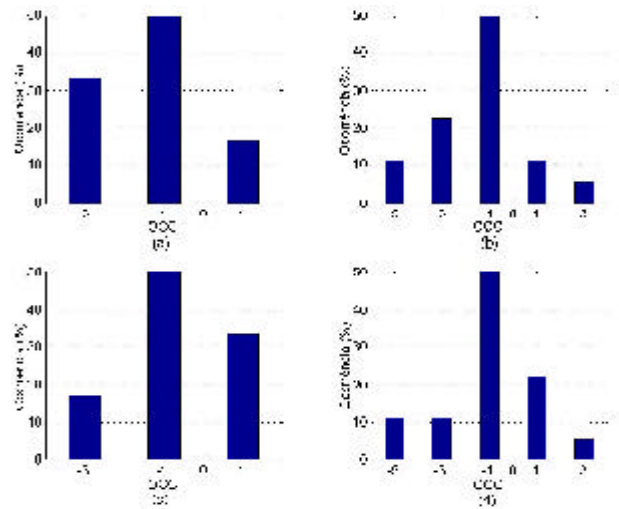


Figura 3 Ocorrências de valores de OCC dos conjuntos de seqüências QS obtidos do conjunto Gold $G(45,73)$: (a) Q_1 , com $t_{máx} = 1T_c$; (b) Q_1 , com $t_{máx} = 2T_c$; (c) Q_4 , com $t_{máx} = 1T_c$; (d) Q_4 , com $t_{máx} = 2T_c$.

qüências possui propriedades de "balanço" e correlação cruzada similares às seqüências de uma subclasse das seqüências GMW (SCHOLTZ; WELCH, 1984; SIMON et al., 1994). Pode-se considerar que as seqüências PN Ótima são uma generalização das seqüências GMW.

Dado um polinômio primitivo de grau n e $z = \frac{(2^n - 1)}{2^m - 1}$ seqüências sementes balanceadas de comprimento $2^m - 1$, obtém-se uma família de Z seqüências PN Ótima balanceadas distintas e de comprimento $N = 2^n - 1$. Esta família é maior que a subclasse de seqüências GMW de propriedades de correlação cruzada similares com $\frac{j(2^m - 1)}{2^m - 1}$ seqüências distintas, onde $j(x)$ denota a função de Euler⁶. O número total de seqüências PN Ótima distintas e de mesmo comprimento somando-se todas as famílias é dado por $\frac{j(2^n - 1)}{2^n - 1} Z$, que é muito maior que o conjunto GMW com $\frac{j(2^n - 1)j(2^m - 1)}{2^n - 1 \cdot 2^m - 1}$ seqüências distintas.

⁴ conjunto construído a partir dos polinômios primitivos $x^5 + x^2 + x^1$ e $x^5 + x^4 + x^3 + x + 1$, ou seja, [45] e [73] em octal, respectivamente.

⁵ O número de chips +1 supera em apenas uma unidade o número de chips -1, pois N é ímpar.

⁶ $\Phi(x)$, chamado de função de Euler, denota o número de inteiros do conjunto $\{0, 1, \dots, x - 1\}$ os quais são primos relativos a x .

Para $0 < |\mathbf{t}| < \frac{2^n - 1}{2^m - 1} T_c$ ou $|\mathbf{t}| \neq (0 \bmod 2^n - 1/2^m - 1) T_c$, todos os valores de ECC para um conjunto de seqüências PN Ótima de uma mesma família são mínimos e iguais a -1, figura 4 (a). Porém, dentro da mesma faixa \mathbf{t} , os valores de OCC não são mínimos, figura 4 (b), isto é, assumem valores, em módulo, maiores que 1. Em um sistema QS-CDMA, é desejável que a função de OCC, também assuma os menores valores, em módulo, possíveis.

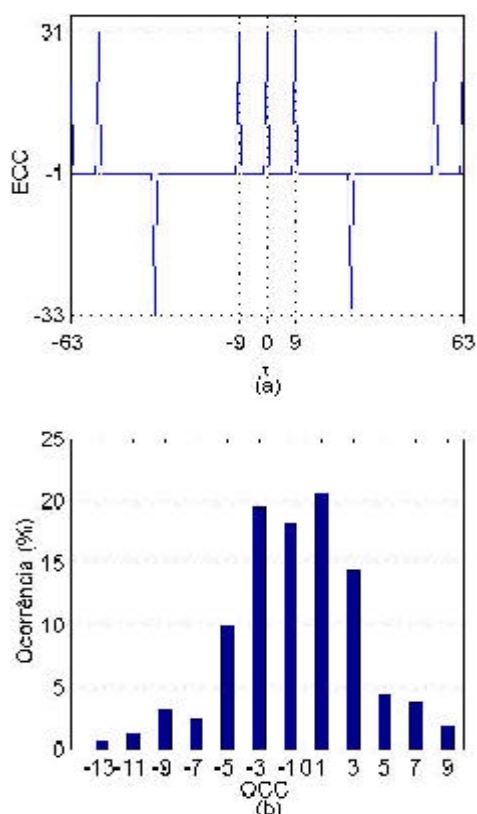


Figura 4. (a) Exemplo da função de ECC de uma seqüência Optimal PN, com $n = 6$, $m = 3$; (b) ocorrências de valores de OCC do conjunto PN Ótima, com $n = 6$, $m = 3$ e $0 < \mathbf{t} < 9$.

No critério adotado em (LIN; CHANG, 1997), existe um compromisso entre a faixa de atrasos \mathbf{t} em que a função de ECC assume valor -1 e o tamanho do conjunto de seqüências distintas na família. Portanto, para se obter carregamento máximo com o

conjunto PN Ótima, adota-se $n = 2m$, reduzindo, em consequência, a faixa \mathbf{t} onde a função de ECC assume valor -1.

Observa-se na figura 4 (a) que a função de ECC assume um valor elevado quando $\mathbf{t} = 0$. Isso implica alta interferência interusuário, quando existirem sinais de usuários sincronizados ou quase sincronizados com \mathbf{t} confinados em pequenas frações de chip. Fora da condição QS, quando $|\mathbf{t}| \geq \frac{2^n - 1}{2^m - 1} T_c$, a função ECC para um conjunto PN Ótima pode também assumir valores elevados, figura 4 (a).

A função de EAC para as seqüências PN Ótima, quando $\mathbf{t} = 0$, assume o valor N . Na condição de $\mathbf{t} \neq 0$, o valor da função de EAC para seqüências PN Ótima geradas a partir de seqüências sementes do tipo SMC (seqüências de máximo comprimento) reduz-se a -1, figura 5 (a), pois neste caso, a seqüência PN Ótima gerada é uma seqüência GMW (LIN; CHANG, 1997; SCHOLTZ; WELCH, 1984; SIMON et al., 1994). Quando as seqüências sementes não são SMC, a função de autocorrelação da PN Ótima apresenta outros picos indesejáveis de menores magnitudes mostrados na figura 5 (b).

Seqüências PS

Em Park et al. (2000a) é proposto um conjunto de seqüências polifásicas⁷ denominado *Park-Park-Song-Suehiro Sequence* (PS), o qual apresenta boas propriedades de correlação para seqüências selecionadas. Dois métodos de seleção foram propostos em Park et al. (2000a) neste trabalho utilizou-se o método de seleção I.

O método de seleção I para seqüências PS (PS-I) garante que a função de ECC seja zero, independente de \mathbf{t} e demais parâmetros utilizados na construção. Em contrapartida, a função de OCC apresenta valores não nulos como ilustrado na figura 6 (a).

⁷ Seqüência composta por um alfabeto de 4 ou mais elementos complexos, $W_N = e^{\frac{j2\pi}{N}}$, onde $j = \sqrt{-1}$ (elementos localizados no círculo unitário do plano complexo), distintos.

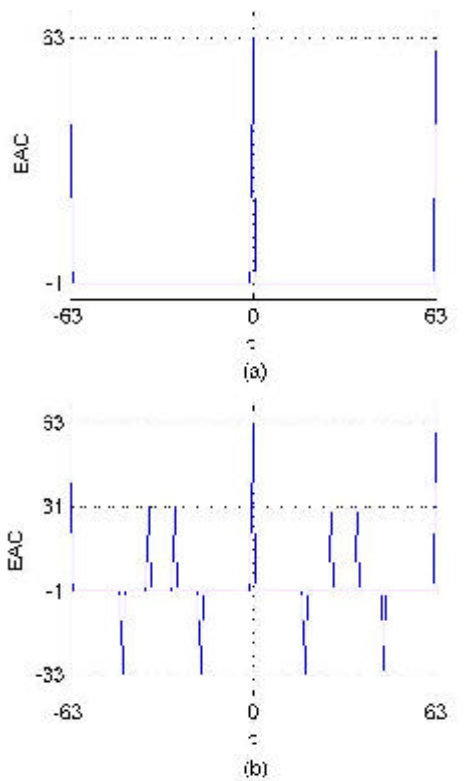


Figura 5. (a) Função EAC da seqüência Optimal PN construída a partir do polinômio primitivo $x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$ e da seqüência de máximo comprimento (SMC) como semente (-1 -1 1 -1 1 1 1); (b) função EAC da seqüência Optimal PN construída a partir do polinômio primitivo $x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$ e da seqüência semente (1 -1 1 1 -1 1 -1).

O comprimento da seqüência N é dado por KN_b^2 , onde K é igual ao número de seqüências disponíveis no conjunto PS-I e N_b é um número inteiro maior que 1, o qual representa o número de símbolos básicos $b_i \in W_N = e^{\frac{2\pi}{N}}$ e $i = 1, 2, \dots, N_b$, utilizados na construção.

O carregamento de um sistema que utiliza todas as seqüências de um conjunto PS-I é dado por $L = \frac{K}{KN_b} = \frac{1}{N_b^2}$ e será no máximo $L_{máx} = 1/4$ quando o número de símbolos básicos for mínimo, $N_b = 2$.

Em um conjunto de seqüências PS, a função de EAC apresentará picos de magnitude N quando $t = iN_b^2, i = 0, 1, 2, \dots, K - 1$, como ilustrado na figura 6 (b). A característica indesejável dos picos de EAC (quando $t = iN_b^2$, com $i = 1, 2, \dots, K - 1$), pode ser amenizada se o intervalo entre picos for estendi-

do adotando-se N_b elevado, porém o número de seqüências disponíveis no conjunto será reduzido. Portanto, deve-se obter um compromisso entre a distância entre os picos da função de EAC e o carregamento do sistema.

Seqüências SP

Em Park et al.(2000b) foi proposto um conjunto de seqüências polifásicas com boas propriedades de correlação: a função de ECC é zero, para qualquer t e a função de OCC assume o valor máximo de N/p . No entanto, a função de EAC apresenta valores extremamente elevados, figura 7, o que é um problema para a etapa de sincronismo do sistema, esse problema, porém, pode ser contornado utilizando-se outras seqüências na etapa de aquisição, com boas propriedades de autocorrelação, como as seqüências Baker (GOLOMB; SCHOLTZ, 1965). Isso, no entanto, eleva a complexidade de implementação e o tempo de processamento na etapa de sincronismo do sistema.

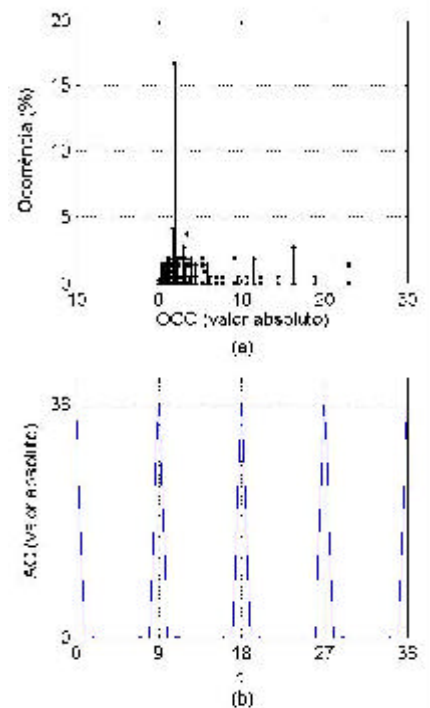


Figura 6. (a) Ocorrência de valores de OCC do conjunto PS-I com $t = iT_c, i = 0, 1, 2, \dots, 35, N_b = 3$ e $K = 4$; (b) função de autocorrelação do conjunto PS, com $N_b = 3$ e $K = 4$.

Tabela 2. Quadro geral comparativo de seqüências de espalhamento para QS-CDMA.

Conjunto	$L_{máx}$	$ R_{i,j \max} $	$t = iN_b^2$	$ \hat{R}_{i,j \max} $	$R_{i,j}(t) = R_{i,j \min} $	$R_{i,i}(t) = R_{i,i \max} $
WH	100%	N	0	-	$t = 0$	$ t = 0,1,2,\dots,N-1$
Seqüências QS, QOQS(3)	$\cong 25\%$	$\left -2^{\frac{n+1}{2}} - 1 \right $	1	-	$ t \in [0,1]$	$t = 0$
PN Ótima	$\left(\frac{2^m - 1}{2^{m-1}} \right) \frac{2^m - 1}{2^n - 1} 100\%$	-	1	-	$ t \in \left[1, \frac{2^n - 1}{2^m - 1} - 1 \right]$	$t = 0$
OS	$\frac{1}{N_b^2} 100\%$	0	0	-	$ t \in [0, N-1]$	$ t = N_b^2 i, i = 0,1,2,\dots, \frac{N}{N_b^2} - 1$
SP, N elevado	$\cong 50\%$	0	0	$\cong \frac{N}{p}$	$ t \in [1, N-1]$	$ t = 0,1,2,\dots,N-1$

O número de seqüências disponíveis em um conjunto SP é dado por $\frac{N-2}{2}$; portanto, o carregamento máximo será dado por $L_{máx} = \frac{1}{2} - \frac{1}{N}$, aproximando-se de 50 % à medida que o comprimento da seqüência

Comparação de seqüências

Na tabela 2 são mostrados o carregamento máximo, $L_{máx}$, de sistemas utilizando cada um dos conjuntos de seqüências descritos na seção anterior, o valor máximo e mínimo da função de ECC, o valor máximo da função de OCC, o intervalo em que o valor da função de ECC é mantida mínima, e o valor de T que resulta em picos da função de EAC.

Note-se que receptores que utilizam os conjuntos de seqüências QS ou PN Ótima não terão problemas no estágio de sincronismo. Em contrapartida, sistemas com $t_{máx} \geq N_b^2 T_c$ que utilizem o conjunto PS terão problemas no estágio de sincronismo devido a

ocorrência de picos de autocorrelação fora de fase. Como a função de EAC para o conjunto WH e SP não tem um intervalo razoável entre picos de EAC, o sistema deve manter o erro máximo de sincronismo $t_{máx} < 1T_c$. Caso o sistema seja incapaz de manter este erro de sincronismo máximo, deverá ser utilizado outro conjunto de seqüências com boas propriedades de EAC na etapa de sincronismo.

Para os conjuntos PS e SP, a função de ECC é ideal, pois assume valor nulo independente de t . A função de ECC do conjunto de seqüências QS apresenta valor máximo consideravelmente menor que o comprimento da seqüência N . Em contrapartida, a função de ECC para o conjunto WH assume valor máximo igual a N . Finalmente, o $L_{máx}$ para os conjuntos de seqüências QS e PN Ótima diminui com o aumento da faixa t em que o valor da função ECC é igual a -1. Para o conjunto PS o $L_{máx}$ é função do intervalo entre picos da função EAC.

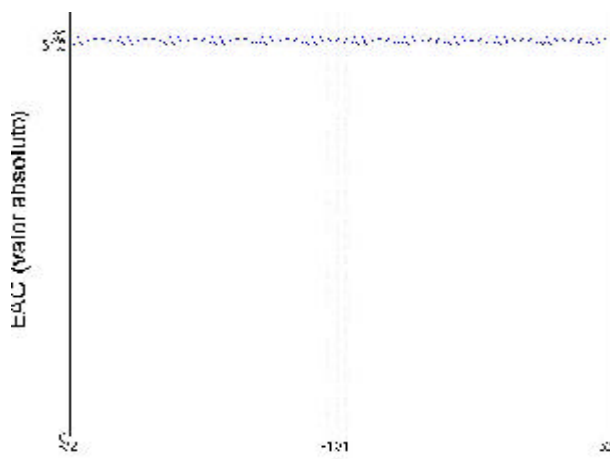


Figura 7. Função de EAC da seqüência c_i do conjunto SP, $N = 32$.

Modelo de Sistema

Para avaliar as propriedades dos conjuntos de seqüências, foi analisado o desempenho comparado de um sistema QS-DS/CDMA em canal AWGN. A figura 8 mostra o modelo do transmissor e receptor.

Considerou-se modulação BPSK, chaveamento por deslocamento de fase binária (*Binary Phase-Shift Keying*). O sinal equivalente em banda base amostrado do k -ésimo usuário pode ser escrito, genericamente, como:

$$u_k(i) = A_k \sum_i b_k(i) s_k \quad (9)$$

onde A_k representa a amplitude do sinal transmitido do k -ésimo usuário, $\{b_k\} \in \{1, -1\}$ é o bit transmitido, s_k é a seqüência de espalhamento empregada na transmissão do símbolo b_k , definida por:

$$s_k(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{c}_k^{(i)} p_{T_c}(t - iT_c), \quad (10)$$

onde $\mathbf{c}_k^{(i)}$ representa o vetor de chips, com elementos complexos $c_k^{(i)} = e^{j\frac{2\pi}{N}}$, de duração T_c , empregado no intervalo de chip definido por i ; $p_{T_c}(\cdot)$ representa o pulso retangular de amplitude unitária no intervalo $[0, T_c)$. O ganho de processamento T_b/T_c será igual a N .

Admitindo-se K_u usuários ativos aproximadamente sincronizados entre si (QS-CDMA), o sinal total recebido equivalente em banda base complexa BPSK pode ser escrito como:

$$r(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^K \sqrt{\frac{2E_k}{T}} b_k(i) s_k(t - iT - \mathbf{t}_k) e^{j\mathbf{f}_k} + n(t),$$

$$t \in [0, T] \quad \text{e} \quad \mathbf{t}_k \in [0, \mathbf{t}_{\max}] \quad (11)$$

onde \mathbf{t}_k é o atraso entre o k -ésimo usuário e o primeiro usuário; \mathbf{t}_{\max} é o máximo atraso inerente ao sistema quase síncrono e $n(t)$ representa o ruído branco aditivo Gaussiano (AWGN) complexo.

O sinal do k -ésimo usuário à saída do filtro casado (*matched filter* - MF), referente ao i -ésimo bit transmitido, será dado por:

$$z_{Conv_k}^{(i)} = \int_{iT + \mathbf{t}_k}^{(i+1)T + \mathbf{t}_k} \text{Re}\{r(t) s_k^*(t - iT - \mathbf{t}_k) e^{-j\mathbf{f}_k}\} dt$$

$$= A_k b_k^{(i)} + I_k^{(i)} + n_k^{(i)}$$

$$t \in [0, T] \quad \text{e} \quad \mathbf{t}_k \in [0, \mathbf{t}_{\max}] \quad (12)$$

onde \mathbf{f}_k é a k -ésima fase de portadora (modificada pelo canal) para o k -ésimo usuário; o primeiro termo é o sinal de interesse, o último é o termo ruído filtrado e $I_k^{(i)}$ o termo MAI. Finalmente, realiza-se a decisão abrupta para o i -ésimo bit do k -ésimo usuário $\hat{b}_k^{(i)}$ a partir de $z_{Conv_k}^{(i)}$:

$$\hat{b}_k^{(i)} = \text{sign}[z_{Conv_k}^{(i)}] \quad (13)$$

Em uma primeira análise, é razoável admitir que os atrasos e fases das portadoras de todos os usuários ativos sejam conhecidos exatamente, e ainda, os atrasos estejam ordenados de forma: $0 \leq \hat{\delta}_1 \leq \hat{\delta}_2 \leq \dots \leq \hat{\delta}_k$, onde $\hat{\delta}_k \in [0, \hat{\delta}_{\max}]$, como mostrado anteriormente.

Simulações

Foi analisado o desempenho do receptor convencional, por meio de simulação Monte Carlo, utilizando os conjuntos de seqüências Walsh-Hadamard, de seqüências QS, PN Ótima, PS e SP, adequadamente selecionados. Os resultados a seguir mostram curvas $BER \times E_b/N_0$, e $BER \times t_{máx\%}$, tanto com controle perfeito de potência, como com disparidades de energia (efeito *Near-Far*), modulação BPSK coerente, formatação de pulso retangular e canal AWGN. Nas curvas $BER \times E_b/N_0$, figuras 9 e 10, consideraram-se que os sinais quase-síncronos são recebidos conforme uma distribuição uniforme no intervalo $[0; 3T_c]$, com passos discretos de t_c/N_s , onde o número de amostras por chip é assumido por $N_s = 3$. Nos gráficos $BER \times t_{máx\%}$ (figuras 11 e 12), é fixado $E_b/N_0 = 10\text{dB}$, sendo os atrasos T distribuídos uniformemente no intervalo $[0, t_{máx\%}]$, sendo $t_{máx\%} = t_{máx}/N$, com passos discretos de $\frac{T}{N_s}$ e o número de amostras por chip dado por $N_s = 10$.

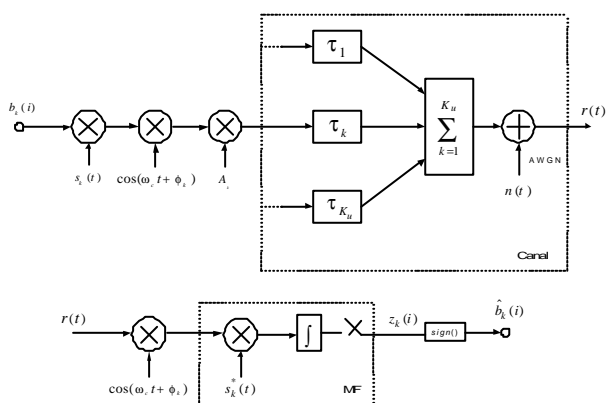


Figura 8. Modelo do transmissor, canal AWGN e receptor convencional.

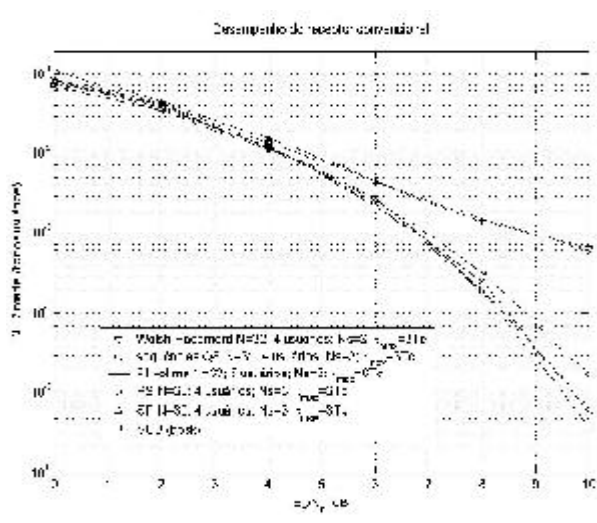


Figura 9. Curva de $BER \times E_b/N_0$; com t_k uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 3T_c]$ e $N_s = 3$ amostras/chip; canal AWGN, e controle perfeito de potência.

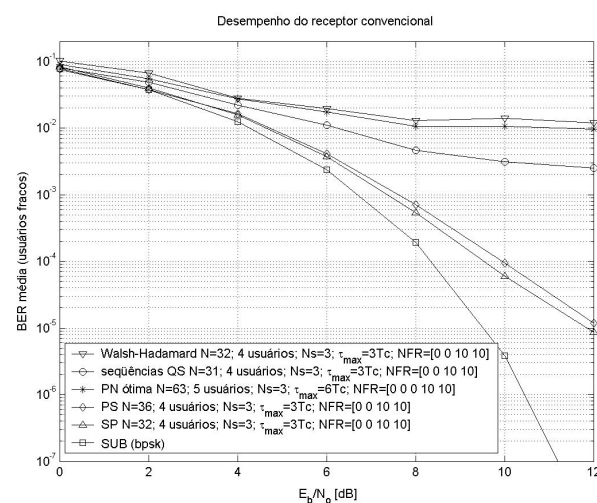


Figura 10. Curva de $BER \times E_b/N_0$; com t_k uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 3T_c]$ e $N_s = 3$ amostras/chip; canal AWGN, e aproximadamente metade dos usuários com $NFR = 10\text{dB}$.

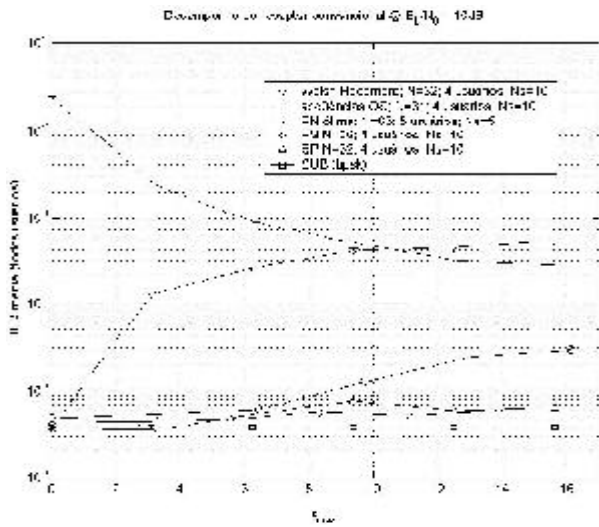


Figura 11. Curva de BER $\times t_{m\acute{a}x}\%$ com t_k uniformemente distribuídos no intervalo $[0, t_{m\acute{a}x}]$ e $N_s = 10$ amostras/chip; $E_b/N_0 = 10\text{dB}$, canal AWGN e controle perfeito de potência.

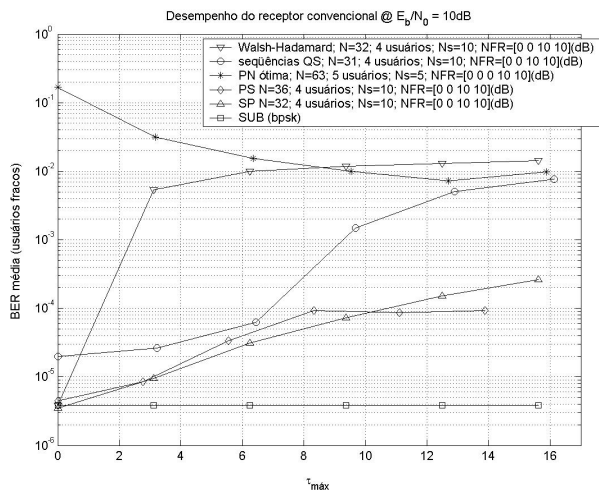


Figura 12. Curva de BER $\times t_{m\acute{a}x}\%$ com t_k uniformemente distribuídos no intervalo $[0; t_{m\acute{a}x}]$ e $N_s = 10$ amostras/chip; $E_b/N_0 = 10\text{dB}$, canal AWGN e aproximadamente metade dos usuários com NFR = 10dB.

Adicionalmente, admitiu-se que os atrasos e fases das portadoras de todos os usuários ativos sejam conhecidos exatamente no receptor. Apesar de essa condição não ser verificada em sistemas práticos, a hipótese é justificada devido ao objetivo de avaliar as ca-

racterísticas dos diferentes conjuntos de seqüências de espalhamento na condição de quase sincronismo.

Os resultados de BER na condição de controle perfeito de potência foram obtidos a partir da média de desempenho sobre todos os usuários ativos. Na condição de efeito *near-far*, os resultados de desempenho mostrados representam a média da taxa de erro de bit BER sobre os usuários mais fracos ativos no sistema.

Os conjuntos de seqüências foram escolhidos de forma a obter carregamentos equivalentes. Foi dada preferência para os conjuntos de N não elevado, pois, para um carregamento fixo, o tempo de simulação aumenta com o aumento do ganho de processamento e amostras por chip. Houve também o cuidado em não diminuir demasiadamente o comprimento das

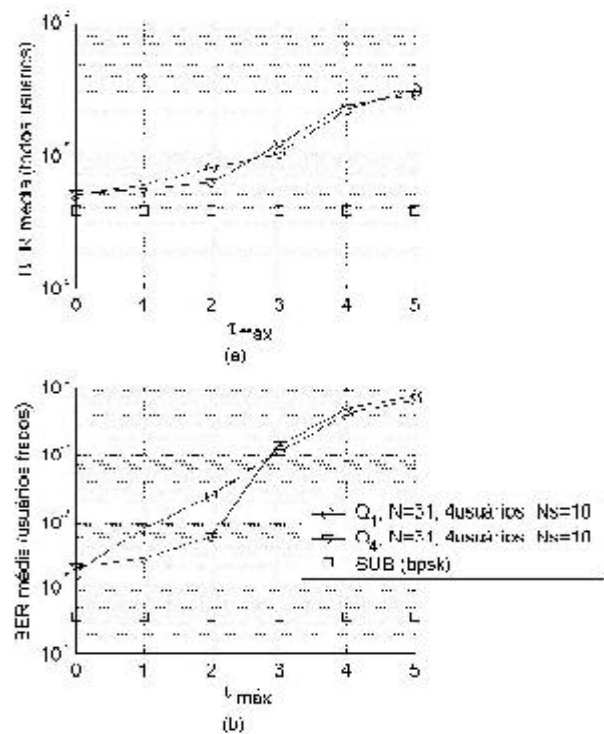


Figura 13. Desempenho do receptor utilizando os subconjuntos Q_1 e Q_4 do conjunto de seqüências QS com propriedade QOQS(5) composto de seqüências de Gold $G(45, 73)$ em canal AWGN com t_k uniformemente distribuídos no intervalo $[0; t_{m\acute{a}x}]$; (a) com controle perfeito de potência; (b) com metade dos usuários com NFR = 10dB.

seqüências, pois o número de usuários ativos diminui proporcionalmente, podendo tornar pouco realista a análise comparativa dos conjuntos de seqüências.

O conjunto de seqüências QS escolhido Q_4 , derivado do conjunto Gold G(45, 73), possui propriedade QOQS(5), ou seja, $R_{i,j}(\mathbf{t}) = -1$ para $\mathbf{t} = 0, \pm 1, \pm 2$, $N = 31$ e um total de 4 seqüências QS (SAITO et al., 2001). Este conjunto em um sistema com erro de sincronismo máximo $\mathbf{t}_{\max} = 2T_c$ resulta em melhor desempenho que o conjunto Q_1 , com propriedades equivalentes na condição QOQS(5), pois as ocorrências de valores de OCC de maior magnitude no intervalo $[0, 1T_c]$ e $[0, 2T_c]$ são maiores no conjunto

Q_1 , seção 3.2. Esse melhor desempenho é ilustrado na condição de controle perfeito de potência, figura 13(a), e com *near-far*, figura 13(b). Note-se que com o aumento de \mathbf{t}_{\max} há uma inversão de desempenho obtido com os conjuntos Q_1 e Q_4 . Portanto a escolha do subconjunto de seqüências QS dependerá do erro máximo de sincronismo \mathbf{t}_{\max} inerente ao sistema.

Para o conjunto PN Ótima, adotou-se $n = 6$, portanto $N = 63$. O maior número de seqüências é obtido quando $n = 2m$ (condição de carregamento máximo), portanto $m = 3$, resultando em 5 seqüências disponíveis. A função ECC será mínima, $R_{i,j}(\mathbf{t}) = -1$, com $0 < |\mathbf{t}| < 9$ ou $\mathbf{t} \neq (0 \bmod 9)$.

Tabela 3. Características dos conjuntos de seqüências de espalhamento para QS-CDMA analisadas.

Conjunto	N	K_u	$L \cong$	$R_{i,j \max}$	$\hat{R}_{i,j \max}$	$R_{i,j}(\mathbf{t}) = R_{i,j \min} $	\mathbf{t}_{\max}
WH	32	4	12,5%	32	32	0	<1
Seqüências QS, QOQS(3)	31	4	13%	9	13	$ \mathbf{t} \in [0,2]$	<31
PN Ótima	63	5	8%	33	33	$ \mathbf{t} \in [1,8]$	<63
PS	36	4	11%	0	22,947	$ \mathbf{t} \in [0,35]$	<9
SP, N elevado	32	4	12,5%	0	10,25	$ \mathbf{t} \in [0,31]$	<1

Para o conjunto PS, adotou-se $N_b = 3$, $K = 4$ e $\mathbf{b}_i = \{0, W_3^1, W_3^2\}$, onde $W_N = e^{j\frac{2\pi}{N}}$, conforme Park et al. (2000a). Então $N = 36$; os picos da função de EAC ocorrerão em $T = 9i$, com $i = 0, 1, 2$ e 3 . Portanto o sistema pode trabalhar com um erro de sincronismo máximo $\mathbf{t}_{\max} = 8T_c$ sem ocorrer problemas de sincronismo inicial.

Para os conjuntos SP e WH adotou-se $N = 32$, e em cada iteração são sorteadas 4 seqüências entre as disponíveis.

A tabela 3 sintetiza as principais características dos conjuntos de seqüências de acordo com os parâmetros escolhidos anteriormente: o ganho de processamento N , o número de usuários ativos K_u , o carregamento do sistema L , os valores máximos resultantes de $R_{i,j}(\mathbf{t})$ e $\hat{R}_{i,j}(\mathbf{t})$ com $0 \leq \mathbf{t} < N$, o inter-

valo em que a ECC é mantida mínima e o máximo erro de sincronismo, T_{\max} , sem ocorrer problemas de sincronismo.

Resultados de Desempenho

Nos sistemas QS-CDMA analisados, observa-se que, para $\mathbf{t}_{\max\%} < 16\%$, os conjuntos PS e SP resultam em melhores desempenhos, figuras 9 a 12. Em ambiente com *near-far*, o desempenho do sistema com seqüências SP será levemente superior ao sistema com seqüências PS para um $\mathbf{t}_{\max\%} < 10\%$. Por sua vez, a utilização de seqüências PS não necessita de um outro conjunto de seqüências na etapa de sincronismo, considerando $L_{\max} \cong 10\%$ e erro de sincronismo $\mathbf{t}_{\max\%} < 25\%$.

A utilização do conjunto de seqüências QS resulta em bom desempenho na condição de quase ortogonalidade QOQS(5), $t_{m\acute{a}x\%} < 6\%$, para $N = 31$. Esse bom desempenho é sensivelmente degradado com o aumento do erro de sincronismo.

Observa-se que o desempenho utilizando o conjunto PN Ótima é baixo quando $t_{m\acute{a}x\%} = 0$ sendo gradualmente melhorado com o aumento de $t_{m\acute{a}x\%}$, tendendo a um desempenho próximo ao conjunto WH, em ambiente com controle perfeito de potência, e ao do conjunto de seqüências QS, em ambiente com *near-far*. A grande quantidade de MAI gerada com a utilização do conjunto PN Ótima com pequenos erros de sincronismo é resultado principalmente do valor elevado da função EAC para pequenos atrasos, seção 3.3.

O desempenho do receptor utilizando o conjunto WH é ótimo para $T_{m\acute{a}x\%} = 0$ sendo rapidamente degradado para pequenos $T_{m\acute{a}x\%}$. Assim, como o conjunto WH, os conjuntos PS e SP resultam em ótimo desempenho no caso de perfeito sincronismo, pois todos esses são ortogonais nesta condição.

Conclusões

Foram analisadas e comparadas as principais características dos conjuntos de seqüências de espalhamento aplicáveis a sistemas QS-CDMA propostos na literatura. As principais propriedades de correlação desses conjuntos foram investigadas na condição de quase sincronismo. O desempenho do sistema QS-CDMA em canal AWGN obtido por simulação Monte-Carlo foi utilizado para comparação dos conjuntos. Verificou-se que com os conjuntos de seqüências QS e com conjuntos de seqüências polifásicas PS e SP o desempenho é pouco degradado quando o atraso entre usuários se mantém confinado em poucas unidades de período de chip. Estes 3 conjuntos apresentam desempenhos similares quando houver controle perfeito de potência. Quando houver desbalanço de potências recebidas ($NFR \neq 0$), o desempenho do sistema com seqüências QS será bastante degradado, enquanto com as seqüências PS e SP a degradação será ainda tolerável. No entanto, as

propriedades de autocorrelação das seqüências SP não são boas, sendo necessária a utilização de outra seqüência na etapa de sincronismo do receptor. Adicionalmente, a transmissão de sinais polifásicos em um sistema com seqüências polifásicas necessita de transmissores dotados de amplificadores de RF altamente lineares. Tais amplificadores reduzem drasticamente a eficiência em potência do sistema, podendo inviabilizar a implementação da unidade móvel.

Visando a uma completa comparação entre os conjuntos de seqüências para sistemas QS-DS/CDMA faz-se necessário ainda caracterizar e comparar o desempenho de sistemas empregando tais conjuntos em canais com desvanecimento e/ou utilizando técnicas avançadas de recepção.

Agradecimentos

Especial agradecimento ao apoio financeiro oferecido pela Ericsson do Brasil.

Referências Bibliográficas

- KUNO, S. et al. A study on quasisynchronous CDMA based on selected PN signature sequences. In: *PROC. INT. SYMP. SPREAD SPECTRUM TECH. APPL*, 1994. p.479-483.
- LIN, X. D.; CHANG, K. H. Optimal PN sequence design for quasisynchronous CDMA communication systems. *IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS*, v.45, p.221-226, Feb., 1997.
- PARK, S. I. et al. Multiple-access interference reduction for QS-CDMA systems with a novel class of polyphase sequences. *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, v.46, p.1448-1458, July, 2000a.
- PARK, S. R., I. et al. New polyphase sequences with good even and odd cross-correlation properties. In: *CENTURY MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE : MILCOM*, 21^{st.}, 2000, Los Angeles. *Proceedings...* Los Angeles, 2000b. v.2., p.574-578.
- PURSLEY, M. B. Performance evaluation for phase coded spread spectrum multiple-access communication - part I: System analysis. *IEEE Transaction on Communication*, v.25, p.795-799, Aug., 1977.

SAITO, M. et al. Generation of sets of sequences suitable for multicode transmission in quasi-synchronous CDMA systems. *IEICE TRANSACTION COMMUNICATION*, v.E84-B, p.576-580, Mar. 2001.

SCHOLTZ, R. A.; WELCH, L. R. GMW sequences. *IEEE TRANSACTION ON INFORMATION THEORY*, v.IT-30, n.3, p.548-553, 1984.

SIMON M. K. et al. *Spread Spectrum Communications Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1994.

GOLOMB, S. W.; SCHOLTZ, R. A. Generalized baker sequences. *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, v.11, p.533-537, Oct., 1965.