



José Leonel Arévalo García

**Brincando com Blocos: Variações da
Transmissão em Blocos e suas Combinações
com a Técnica de Múltiplo Acesso CDMA**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Sistemas de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Raimundo Sampaio Neto
Co-Orientador: Prof. César Medina

Rio de Janeiro
Agosto de 2012



José Leonel Arévalo García

**Brincando com Blocos: Variações da
Transmissão em Blocos e suas Combinações
com a Técnica de Múltiplo Acesso CDMA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Sistemas de Telecomunicações do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Raimundo Sampaio Neto

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. César Medina

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Marco Grivet

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Rodrigo Caiado de Lamare

Universidade de York

Prof. José Mauro Pedro Fortes

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro de Estudos em
Telecomunicações (CETUC) — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 6 de Agosto de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

José Leonel Arévalo García

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Nacional Autónoma de Honduras (Tegucigalpa, Honduras), estudos em Matemáticas na Universidade Nacional Autónoma de Honduras (Tegucigalpa, Honduras). Trabalhou na empresa Navega com sistemas de telecomunicações em fibra ótica baseados na tecnologia SDH, DWDM e Ethernet over SDH.

Ficha Catalográfica

García, José Leonel Arévalo

Brincando com Blocos: Variações da Transmissão em Blocos e suas Combinações com a Técnica de Múltiplo Acesso CDMA / José Leonel Arévalo García; orientador: Raimundo Sampaio Neto; co-orientador: César Medina. – 2012.

84 f: il.(color.) ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Transmissão em Blocos. 3. Portadora Única 4. Múltiplas Portadoras. 5. CDMA. 6. Canais Seletivos em Frequência. 7. Desacoplamento Ideal dos Usuários. I. Sampaio-Neto, Raimundo. II. Medina, César. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

Agradecimentos

Aos meus queridos pais, Ercília e Leoneth, por terem me ensinado e cultivado o espírito acadêmico.

À Sonia Ferrera pelo apoio e compreensão em momentos de dificuldade e por ter trazido ao mundo a maior motivação da minha vida, a pessoa que enche de felicidade meu coração e que me faz sorrir mesmo nas situações complicadas, minha filha Maria José. *Te amo filha!*

Aos meus irmãos, Carolina, Jorge e Mary, que estiveram sempre comigo, apoiando-me incondicionalmente.

Ao meu grande amigo Josué Molina, pela amizade e pelas longas conversas procurando o sentido da existência, valeu Josué.

Aos meus amigos e colegas do CETUC, em especial ao Byron Maza, camarada do princípio ao fim nessa longa jornada de aprendizagem.

Aos meus amigos de Honduras que apesar do tempo e da distancia, a luz da nossa amizade continua brilhando.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Aos professores do CETUC, principalmente ao professor Weiler Finamore por ter proporcionado um ambiente excelente nos meus primeiros dias no Brasil.

Ao meu co-orientador, Professor César Medina pela orientação.

O maior agradecimento ao meu orientador, Professor Raimundo Sampaio Neto, pelo apoio, simpatia de sempre, disposição constante em me ajudar, e por acompanhar de perto a evolução deste trabalho. Muito obrigado por fazer parte fundamental da minha vida acadêmica. Para mim o senhor é um exemplo a ser seguido, não só no ambiente profissional, mas também como pessoa. Estarei eternamente grato professor.

Resumo

García, José Leonel Arévalo; Sampaio-Neto, Raimundo; Medina, César. **Brincando com Blocos: Variações da Transmissão em Blocos e suas Combinações com a Técnica de Múltiplo Acesso CDMA.** Rio de Janeiro, 2012. 84p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Além de apresentar uma visão unificada das técnicas de transmissão digital em blocos e suas combinações com a técnica de múltiplo acesso CDMA (*Code Division Multiple Access*), esta dissertação examina uma nova possível técnica de transmissão para sistemas com múltiplo acesso, aqui chamada CS-CDMA (*Chip-Spread Code Division Multiple Access*), combinada com as técnicas de transmissão em blocos, em portadora única (SC-*Single Carrier*), gerando o esquema SC CS-CDMA, e em múltiplas portadoras OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), gerando o esquema MC CS-CDMA. Comparações de desempenho com os sistemas de transmissão por blocos CDMA de portadora única conhecido como SC CDMA (*Single Carrier Code Division Multiple Access*) e de múltiplas portadoras conhecido como MC CDMA (*Multi Carrier Code Division Multiple Access*) são apresentadas. Uma característica marcante da técnica de transmissão enfocada é que, diferentemente do que ocorre nos sistemas 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 CS-CDMA, quando os sinais são transmitidos em portadora única, sobre o tradicional CDMA. Os resultados consideram recepção com equalização no domínio da frequência utilizando equalizadores do tipo ZF (*Zero Forcing*) e MMSE (*Minimum Mean Squared Error*).

Palavras-chave

Transmissão em Blocos; Portadora Única; Múltiplas Portadoras; CDMA; Canais Seletivos em Frequência; Desacoplamento Ideal dos Usuários.

Abstract

García, José Leonel Arévalo; Sampaio-Neto, Raimundo; Medina, César. **Playing Whit Blocks: Variations of Blocks Transmission and their Combinations with the Technique of Multiple Access CDMA**. Rio de Janeiro, 2012. 84p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In addition to presenting a unified view of digital blocks transmission technologies and their combinations with the technique of multiple access CDMA (Code Division Multiple Access), this dissertation addresses a new possible transmission technique for multiple access system, called here CS-CDMA (*Chip-Spread Code Division Multiple Access*), combined with blocks transmissions techniques, in single carrier (SC- *Single Carrier*), generating scheme SC CS-CDMA, and in multi carrier OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), generating scheme MC CS-CDMA. Performance comparisons with the traditional SC CDMA (*Single Carrier Code Division Multiple Access*) and MC CDMA (*Multi Carrier Code Division Multiple Access*) block transmission system are presented. A key feature of the proposed transmission technique is that, differently from what occurs with 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 CS-CDMA, over the traditional CDMA, when signals are transmitted in single carrier. The simulation results consider frequency domain ZF (Zero Forcing) and MMSE (Minimum Mean Squared Error).

Keywords

Block Transmission; Single Carrier; Multi Carrier; CDMA; Frequency Selective Channel; Ideal User Decoupling.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Objetivo	12
1.2	Contribuições da Pesquisa	13
1.3	Organização do Texto	13
1.4	Notação Adotada	14
1.5	Lista de Abreviações	14
2	Transmissão e recepção de sinais em blocos	16
2.1	Transmissão de sinais em portadora única (Single Carrier) e OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).	16
2.2	Recepção de sinais em portadora única (Single Carrier) e OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).	20
2.3	Modelo do canal	24
2.4	Equalização no domínio da frequência FDE	24
3	Transmissão em blocos combinada com a técnica de múltiplo acesso CDMA	33
3.1	CDMA (Code Division Multiple Access)	33
3.2	Sistema SC CDMA	35
3.3	Sistema MC CDMA	36
3.4	Equalização no domínio da frequência FDE	38
3.5	Resultados Numéricos	43
3.6	Considerações Finais	52
4	Chip-Spread CDMA com Transmissão em Blocos	53
4.1	CS-CDMA	53
4.2	Sistema MC CS-CDMA	54
4.3	Sistema SC CS-CDMA	55
4.4	Equalização no domínio da frequência FDE	56
4.5	Resultados Numéricos	63
4.6	Considerações Finais	64
5	Comparação dos sistemas CDMA versus CS-CDMA combinados com as técnicas de transmissão em blocos.	67
5.1	Condições para a comparação	67
5.2	SC CDMA versus SC CS-CDMA com faixa de guarda CP	68
5.3	SC CDMA versus SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP	68
5.4	MC CDMA versus MC CS-CDMA com faixa de guarda CP	70
5.5	MC CDMA versus MC CS-CDMA com faixa de guarda ZP	71
5.6	Considerações Finais	73
6	Conclusão e trabalhos futuros	76
A	Apêndice	82

Lista de figuras

2.1	Espectro de um sinal OFDM com 4 portadoras.	17
2.2	Faixa de Guarda com Prefixo Cíclico.	18
2.3	Faixa de Guarda com Zero Padding.	19
2.4	Modelo conjunto dos sistemas SC e OFDM com equalização no domínio da frequência.	26
3.1	Sistema CDMA para o canal de subida (<i>Up-link</i>).	34
3.2	Representação da sequência de blocos transmitidos pelo k -ésimo usuário no sistema CDMA.	35
3.3	BER versus E_b/N_0 para o sistema SC CDMA com Faixa de guarda CP.	44
3.4	BER versus E_b/N_0 para o sistema SC CDMA com Faixa de guarda ZP.	45
3.5	BER versus E_b/N_0 para o sistema SC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP.	46
3.6	BER versus E_b/N_0 para o sistema MC CDMA com Faixa de guarda CP.	46
3.7	BER versus E_b/N_0 para o sistema MC CDMA com Faixa de guarda ZP.	47
3.8	BER versus E_b/N_0 para o sistema MC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP.	48
3.9	BER versus E_b/N_0 para os sistema SC CDMA e MC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP com carga de 8 usuários.	48
3.10	BER versus E_b/N_0 para os sistema SC CDMA e MC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP com carga de 4 usuários.	49
3.11	BER versus Carga para o sistema SC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF.	49
3.12	BER versus Carga para o sistema MC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF .	50
3.13	BER versus Carga para os sistemas SC-CDMA e MC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE .	51
3.14	BER versus Carga para os sistemas SC-CDMA e MC CDMA com Faixa de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização ZF.	51
4.1	Representação do bloco transmitido para o k -ésimo usuário no sistema CS-CDMA.	53
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 $K \leq 16$).	64
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 $K \leq 16$).	65
4.4	BER versus E_b/N_0 para os sistema SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com equalização ZF (Número de usuários $K \leq 16$).	65
4.5	BER versus E_b/N_0 para os sistema SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com equalização MMSE (Número de usuários $K \leq 16$).	66

5.1	BER versus E_b/N_0 para o sistema SC CDMA versus SC CS-CDMA com faixa de guarda CP.	69
5.2	BER versus Carga para o sistema SC CDMA versus SC CS-CDMA com faixa de guarda CP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	69
5.3	BER versus E_b/N_0 para o sistema SC CDMA versus SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP.	70
5.4	BER versus Carga para o sistema SC CDMA versus SC CS-CDMA com faixa de guarda ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	71
5.5	BER versus E_b/N_0 para o sistema MC CDMA versus MC CS-CDMA com faixa de guarda CP.	72
5.6	BER versus Carga para o sistema MC CDMA versus MC CS-CDMA com faixa de guarda CP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	72
5.7	BER versus E_b/N_0 para o sistema MC CDMA versus MC CS-CDMA com faixa de guarda CP.	73
5.8	BER versus Carga para o sistema MC CDMA versus MC CS-CDMA com faixa de guarda ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	74
5.9	BER versus Carga para o sistema SC CS-CDMA versus MC CDMA com $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE	74
A.1	BER versus Carga para o sistema SC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	82
A.2	BER versus Carga para o sistema MC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	83
A.3	BER versus Carga para os sistemas SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização ZF	83
A.4	BER versus Carga para os sistemas SC CS-CDMA e MC CS-CDMA com as faixas de guarda CP e ZP, $E_b/N_0 = 10dB$ e equalização MMSE e ZF	84

Lo esencial no está en ser poeta, ni artista ni filósofo. Lo esencial es que cada uno tenga la dignidad de su trabajo, la conciencia de su trabajo. El orgullo de hacer las cosas bien, el entusiasmo de sentirse transitoriamente satisfecho de su obra, de quererla, de admirarla, es la sana recompensa de los fuertes, de los que tienen el corazón robusto y el espíritu limpio. Dentro de los sagrados números de la naturaleza, ninguna labor bien hecha vale menos, ninguna vale más. Todos representamos fuerzas capaces de crear. Todos somos algo necesario y valioso en la marcha del mundo, desde el momento en que entramos a librar la batalla del porvenir.

Alfonso Guillén Zelaya, *Lo Esencial*.