

Semana Internacional das Telecomunicações

Inatel

Instituto Nacional de Telecomunicações



Dayan Adionel Guimarães
INATEL - Outubro/2000

Objetivos da palestra

- Oferecer aos participantes uma visão geral sobre a técnica de modulação por multiportadoras, especificamente sobre a técnica MC-DS-CDMA.
- Apresentar o resultado do estudo realizado pelo palestrante em seu trabalho de mestrado.
- Apresentar alguns aspectos relacionados à codificação de canal para sistemas com multiportadoras.
- Apresentar as propostas de estudo do palestrante em seu trabalho de doutorado.

Single Carrier x Multicarrier

- Aumento da taxa de transmissão.
- Aumento da eficiência espectral.

Principais facilitadores

- Baixa interferência intersimbólica por portadora.
- Melhor robustez contra desvanecimento seletivo.
- Possível diversidade temporal e em frequência.
- Flexibilidade de composição do espectro final.
- *One-tap equalization.*
- Facilidade de estimação dos parâmetros do canal.
- Espectro similar ao espectro de Nyquist

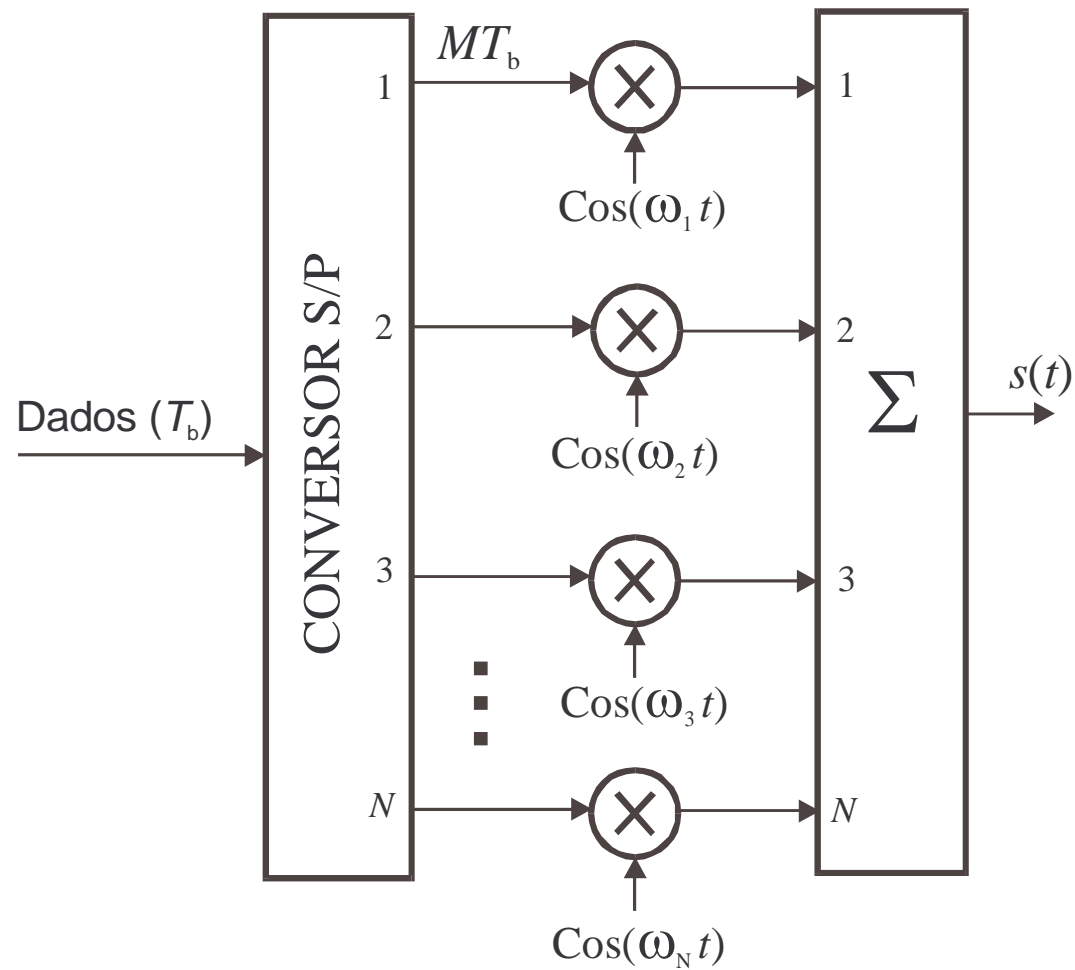
Sistema OFDM

A forma mais comum de implementação de um sistema com multiportadoras é a convencional FDM (*Frequency Division Multiplexing*). O problema: baixa eficiência espectral devido aos fatores de *roll-off* dos filtros levarem à uma separação entre as subportadoras maior que a banda de Nyquist [Hay01]. Solução: sobreposição de subportadoras ortogonais. Uma possível alternativa é conhecida como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [Wei71], [Zou95].

A ortogonalidade entre as subportadoras é conseguida escolhendo-se o espaçamento entre elas igual ao recíproco da duração do símbolo por subportadora. Um símbolo OFDM é formado pela passagem da seqüência de símbolos original por um conversor série-paralelo. Cada saída do conversor modula uma subportadora.

A real implementação via IDFT/DFT simplifica o modulador e o demodulador [Wei71], [Wan00], [Cio9X].

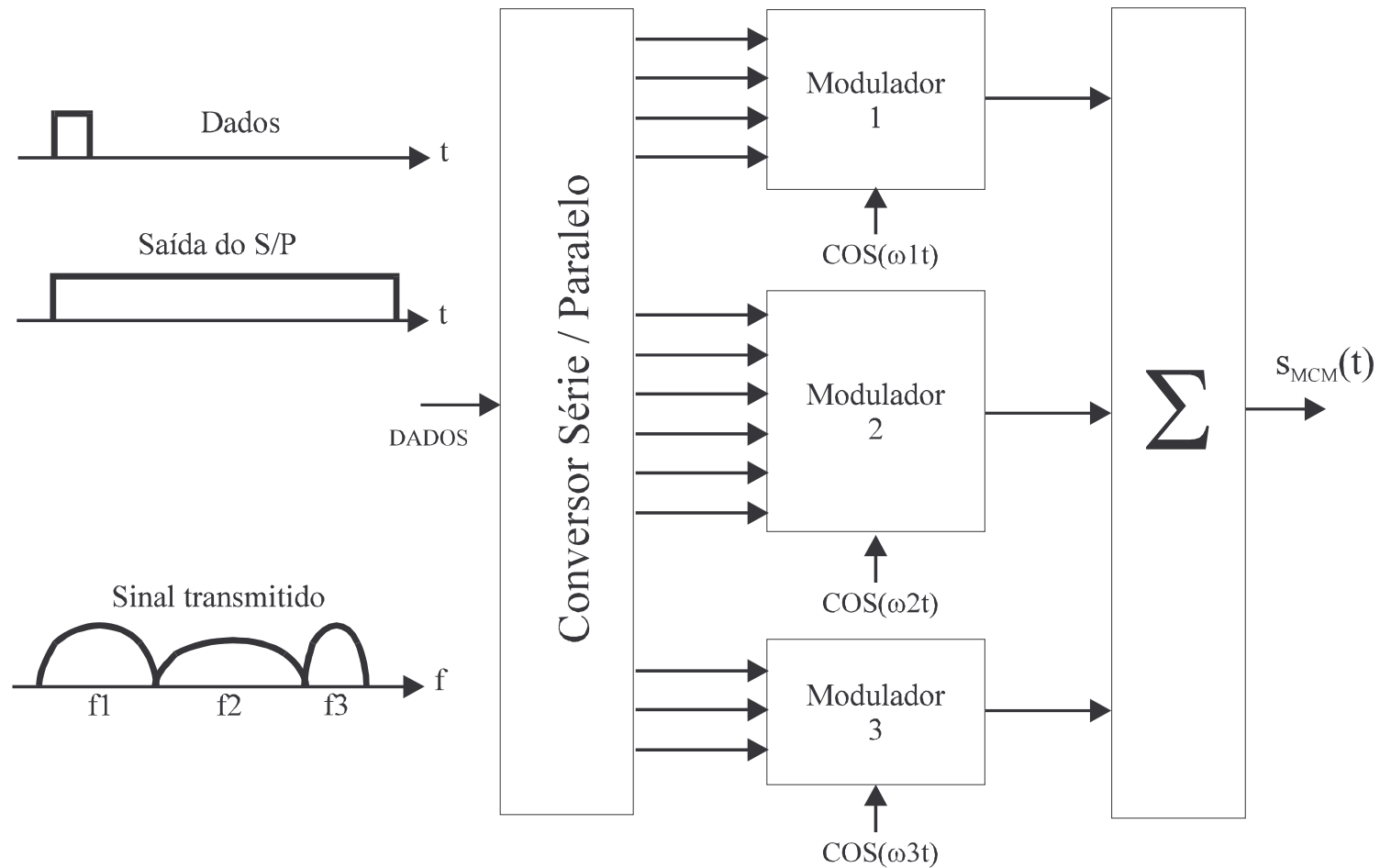
Ilustração do transmissor de um sistema OFDM



Sistema MCM

Uma implementação de um sistema multiportadoras, ainda sem associação a uma técnica de acesso múltiplo, denominada Modulação Multiportadoras, MCM (*Multicarrier Modulation*), é mostrada em [Bin90]. Tal técnica é semelhante àquela utilizada nos *modems* de alta velocidade HDSL (*High-rate Digital Subscriber Line*). Nesse esquema a seqüência de bits de entrada do modulador é convertida para a forma paralela e as saídas são agrupadas em vários grupos de tamanho variável. Cada grupo de bits modula uma portadora através de uma técnica de modulação com número de níveis diferentes e os sinais resultantes são somados antes de serem enviados ao meio de comunicação. Através de um adequado controle da potência de transmissão nas sub-bandas, baseado no princípio do “enchimento de água” [Pro95; p. 687], garante-se a maximização da capacidade de transmissão através do canal. Como resultado tem-se uma taxa de transmissão superior àquela que seria conseguida com um sistema de portadora única, para um mesmo canal considerado.

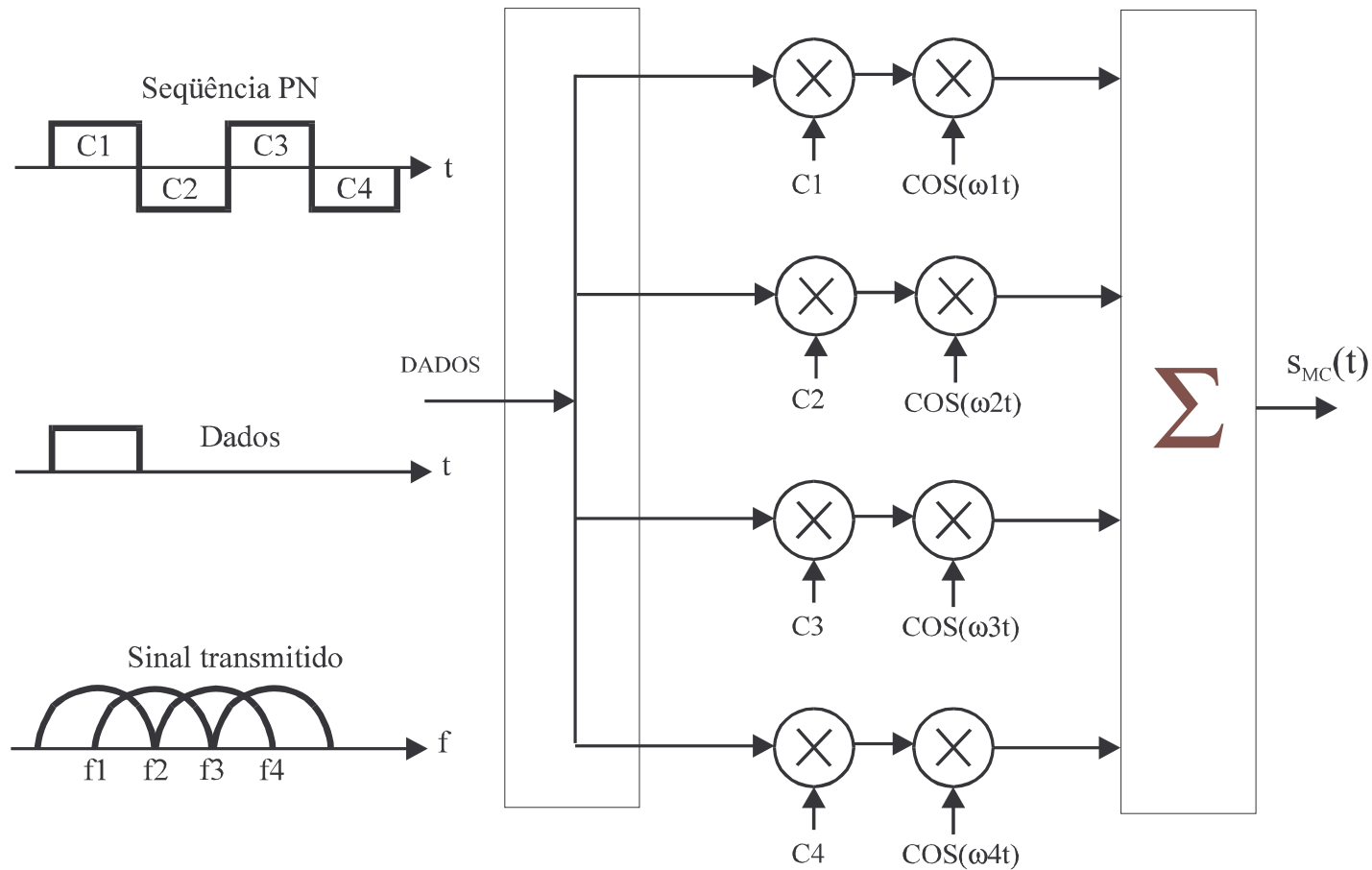
Ilustração do transmissor de um sistema MCM



Sistema MC-CDMA

No sistema proposto em [Yee93], denominado MC-CDMA (*Multi-Carrier CDMA*), ocorre uma combinação entre o espalhamento no domínio da frequência e modulação com multiportadoras. São geradas várias réplicas de cada bit da seqüência original de dados bipolar e cada réplica é modulada por um *chip* diferente da seqüência pseudo aleatória. Os sinais resultantes dessa multiplicação modulam diferentes portadoras ortogonais.

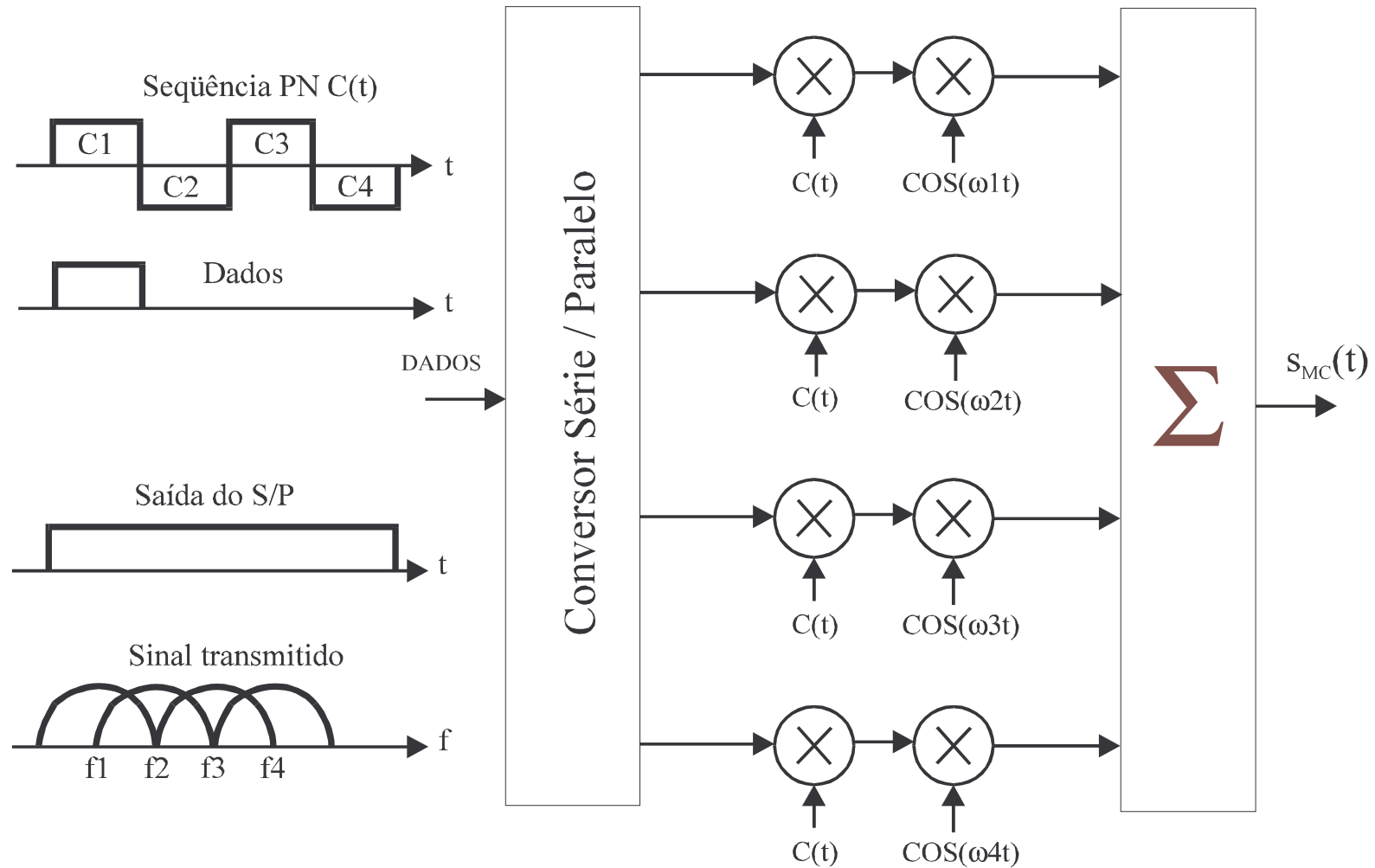
Transmissor de um sistema MC-CDMA



Sistema MC-DS-CDMA

Outra possível implementação é denominada de Sistema DS-SS-SS-SS com Multiportadoras ou Sistema CDMA Sequência Direta Multiportadoras [Har96]. Nele, a seqüência original de bits sofre uma conversão para a forma paralela em N ramos e os bits bipolares em cada ramo multiplicam uma mesma seqüência pseudo aleatória (espalhamento espectral por seqüência direta). O resultado da multiplicação em cada ramo modula uma portadora dentre as N portadoras ortogonais.

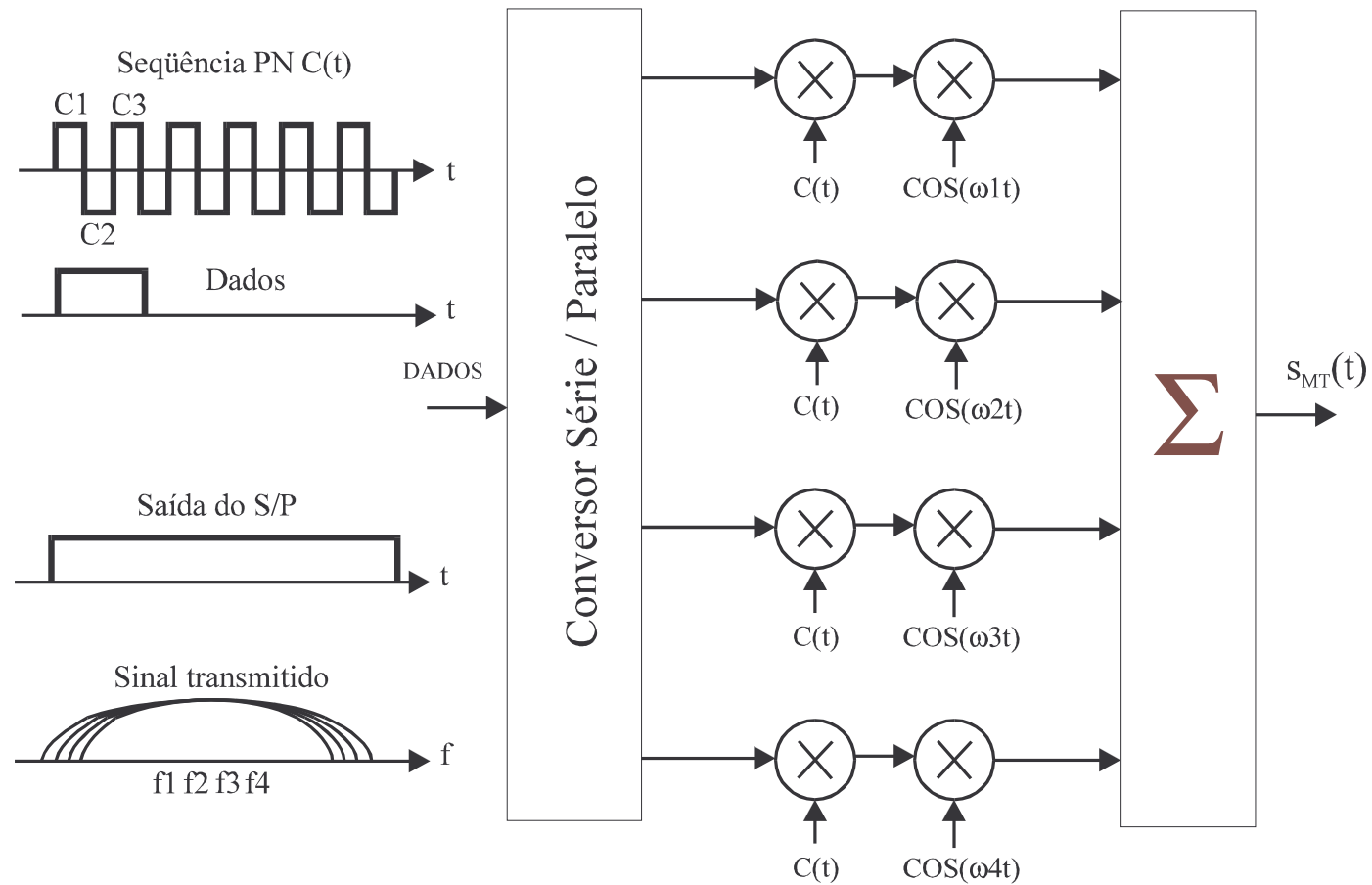
Transmissor de um sistema MC-DS-CDMA



Sistema MT-CDMA

Uma outra implementação é denominada de CDMA Multitom, MT-CDMA (*Multi Tone* CDMA) [Har96]. Nela, a seqüência de bits de entrada sofre conversão para a forma paralela e os bits bipolares de cada ramo são multiplicados por uma mesma seqüência pseudo aleatória de taxa muitas vezes superior àquela utilizada nos sistemas anteriores. O resultado dessa multiplicação modula portadoras diferentes em cada ramo, com espaçamento em freqüência suficiente à ortogonalidade entre as portadoras antes do processo de espalhamento.

Transmissor de um sistema MT-CDMA

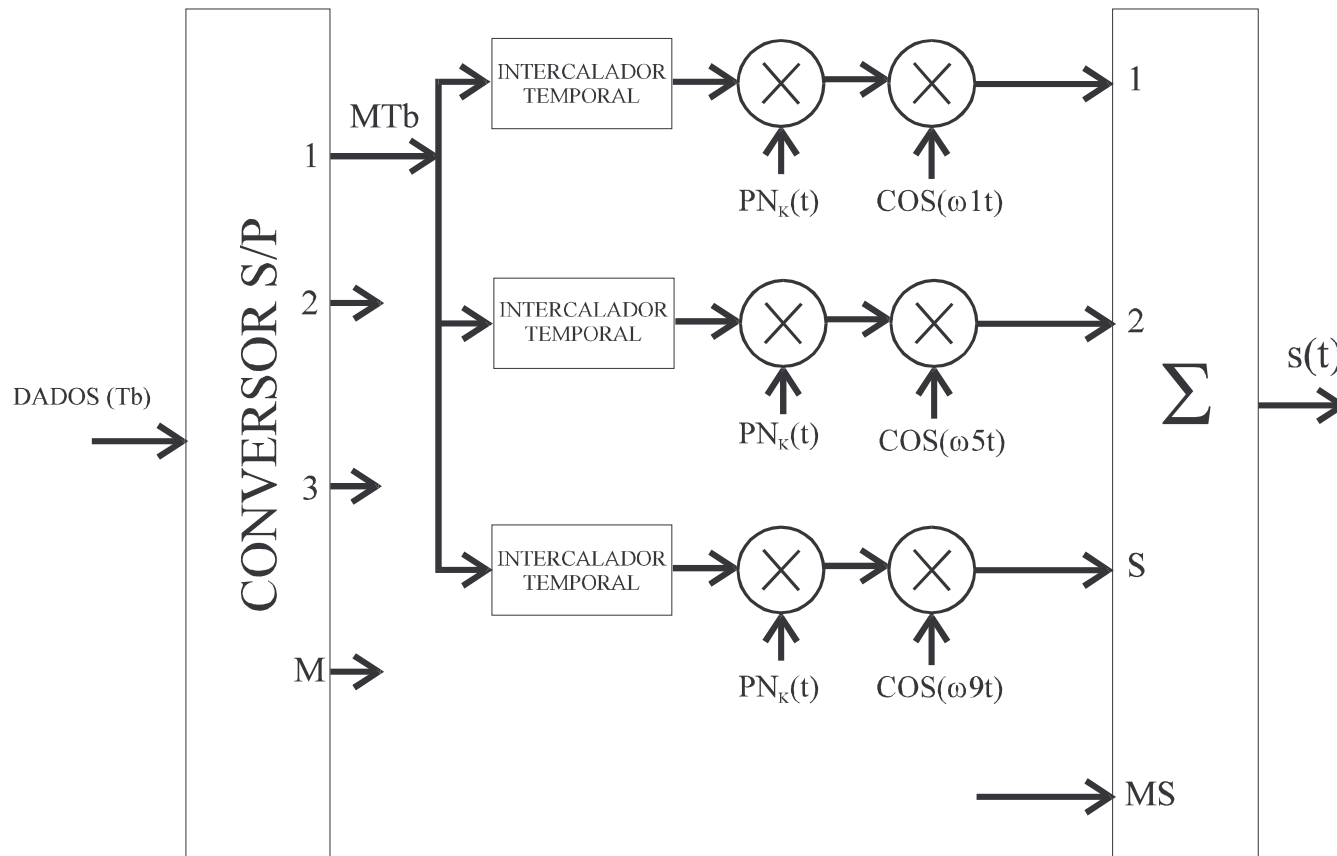


Um outro sistema MC-DS-CDMA

Em [Sou96] é apresentada uma proposta de um sistema DS-CDMA Multiportadoras que parece ser uma combinação ou generalização de dois dos esquemas já mostrados. Suas principais características são:

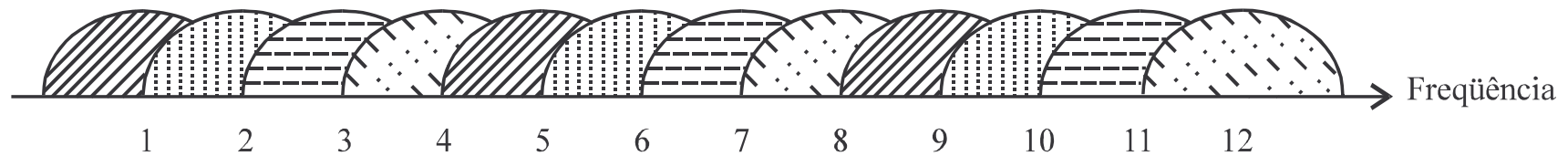
- possibilidade de implementação simultânea de diversidade temporal e em frequência;
- redução da interferência intersimbólica causada pelos multipercursos;
- possibilidade de superar o desempenho dos receptores RAKE convencionais;
- possibilidade de aumento da eficiência espectral (aumento do ganho de processamento).

Ilustração do transmissor do Sistema MC-DS-CDMA para $M = 4$ e $S = 3$



Sistema MC-DS-CDMA -sinal transmitido

Ilustração para $M = 4$ e $S = 3$



Ganho de Processamento

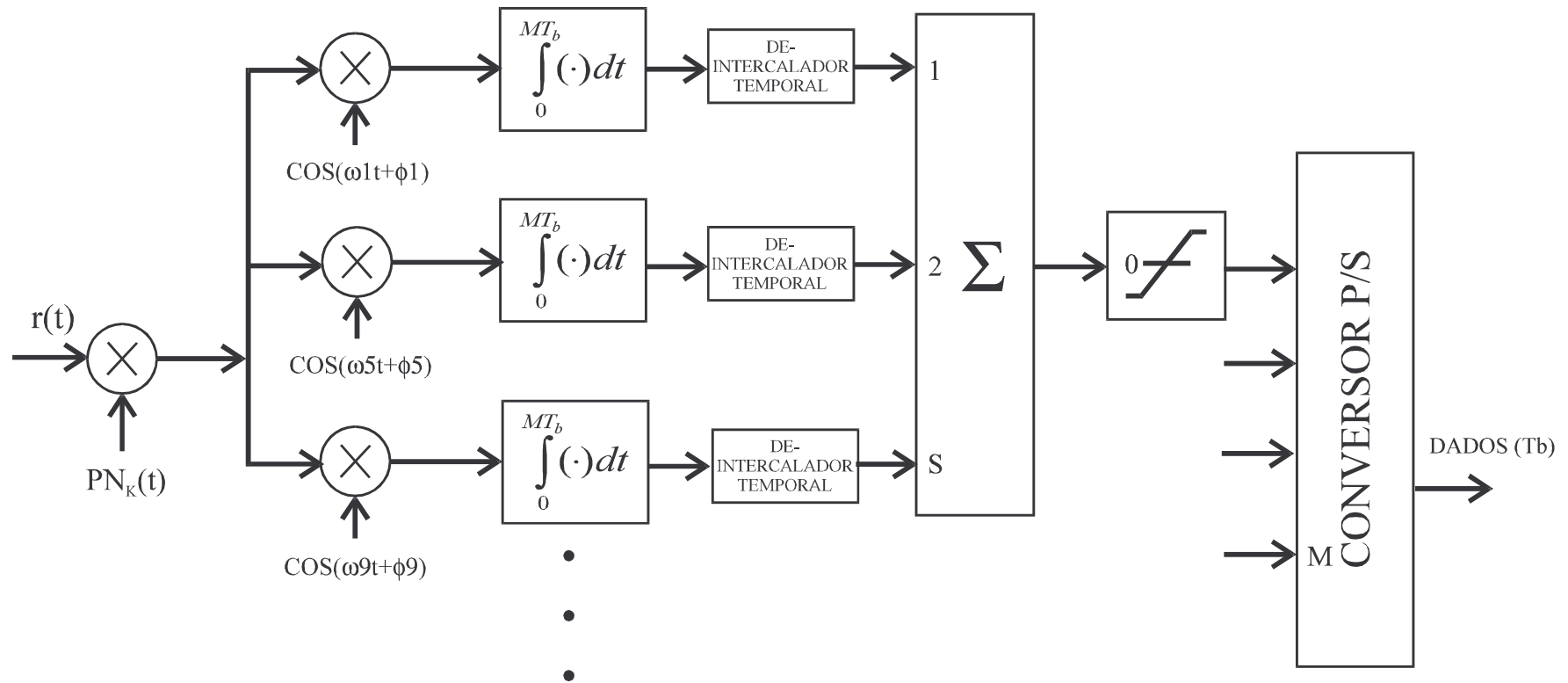
1 - Portadora única:

$$GP_U = \frac{BW_{total}}{BW_{sinal\ não\ espalhado}} = \frac{BW_{subportadora}}{BW_{sinal\ não\ espalhado}} \cdot \frac{(MS + 1)}{2}$$

2 - Multiportadora:

$$GP_M = \frac{BW_{subportadora}}{BW_{sinal\ não\ espalhado}} \cdot MS \cong 2 \cdot GP_U$$

Ilustração do receptor de um usuário para o Sistema MC-DS-CDMA



Um novo sistema MC-DS-CDMA

Em [Mat99] é apresentada uma proposta de um sistema DS-CDMA Multiportadoras com espalhamento no domínio da frequência. Suas principais características são:

- Tem-se diversidade em frequência sem a necessidade de redundância (repetição) no domínio do tempo ou da frequência.
- Seu desempenho pode, em algumas situações, superar o desempenho do sistema DS-CDMA convencional e do sistema MC-CDMA (que também utiliza espalhamento no domínio da frequência [Yee93]).
- Esse sistema parece ser uma combinação, com algumas modificações, do sistema proposto em [Sou96] com aquele proposto em [Yee93].

A Dissertação de Mestrado

Esquemas de Codificação para um Sistema DS-CDMA com Portadoras Ortogonais

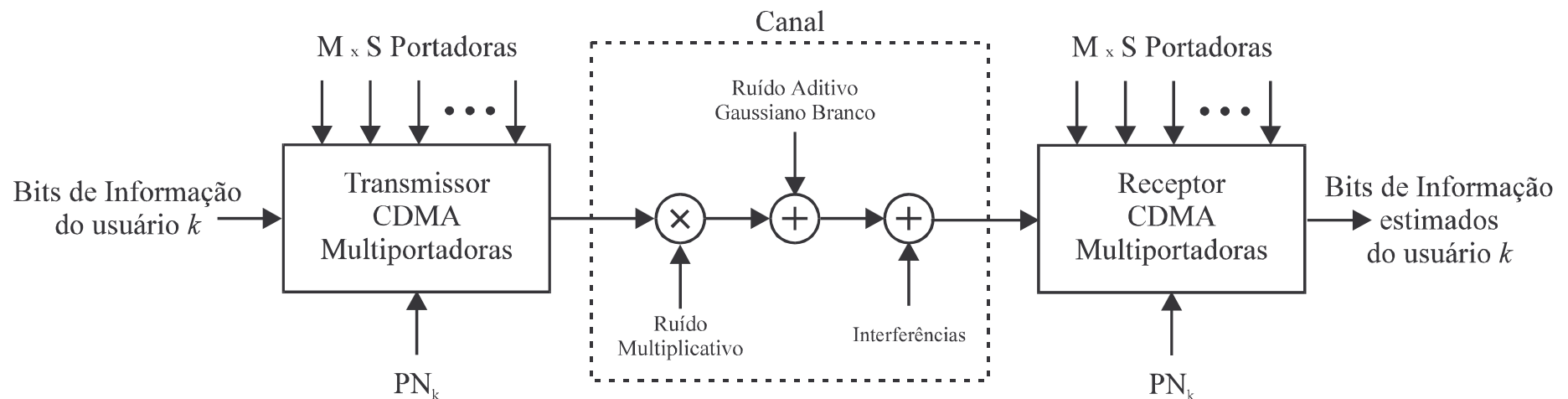
O trabalho de mestrado

- Simulação do sistema original para validar o processo de simulação.
- Simulação do sistema original com regra de combinação MRC.
- Esquema de codificação 1 (convencional): o codificador na entrada do sistema original e o decodificador na saída.
- Esquema de codificação 2: repetição do sistema original substituída por um código de bloco (16,5,8) e combinador EGC substituído pelo decodificador de Wagner.
- Esquema de codificação 3: combinação de repetição com codificação não trivial.

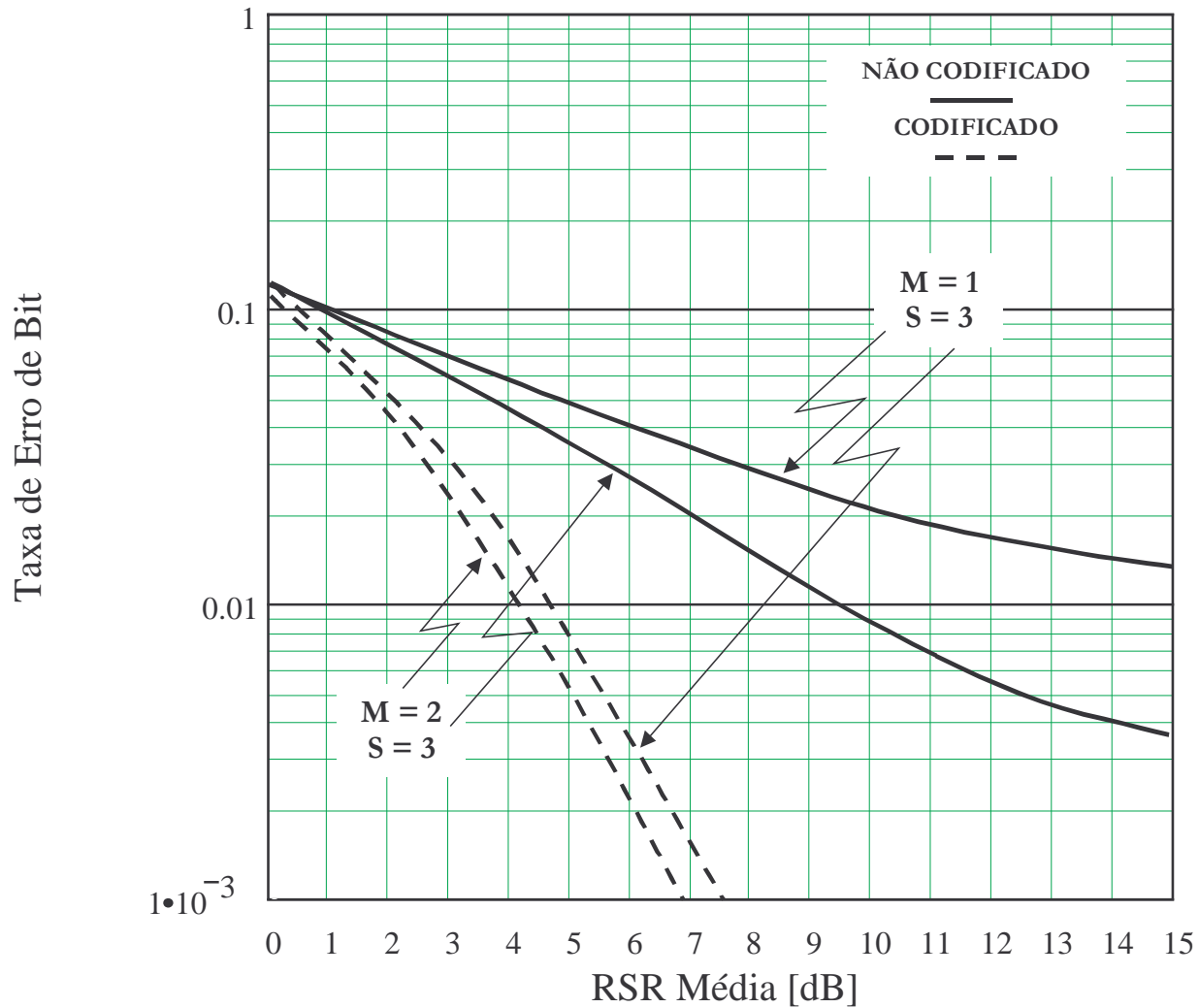
Sobre a simulação

O trabalho original [Sou96]: investigação analítica;
BER obtida por integração numérica.

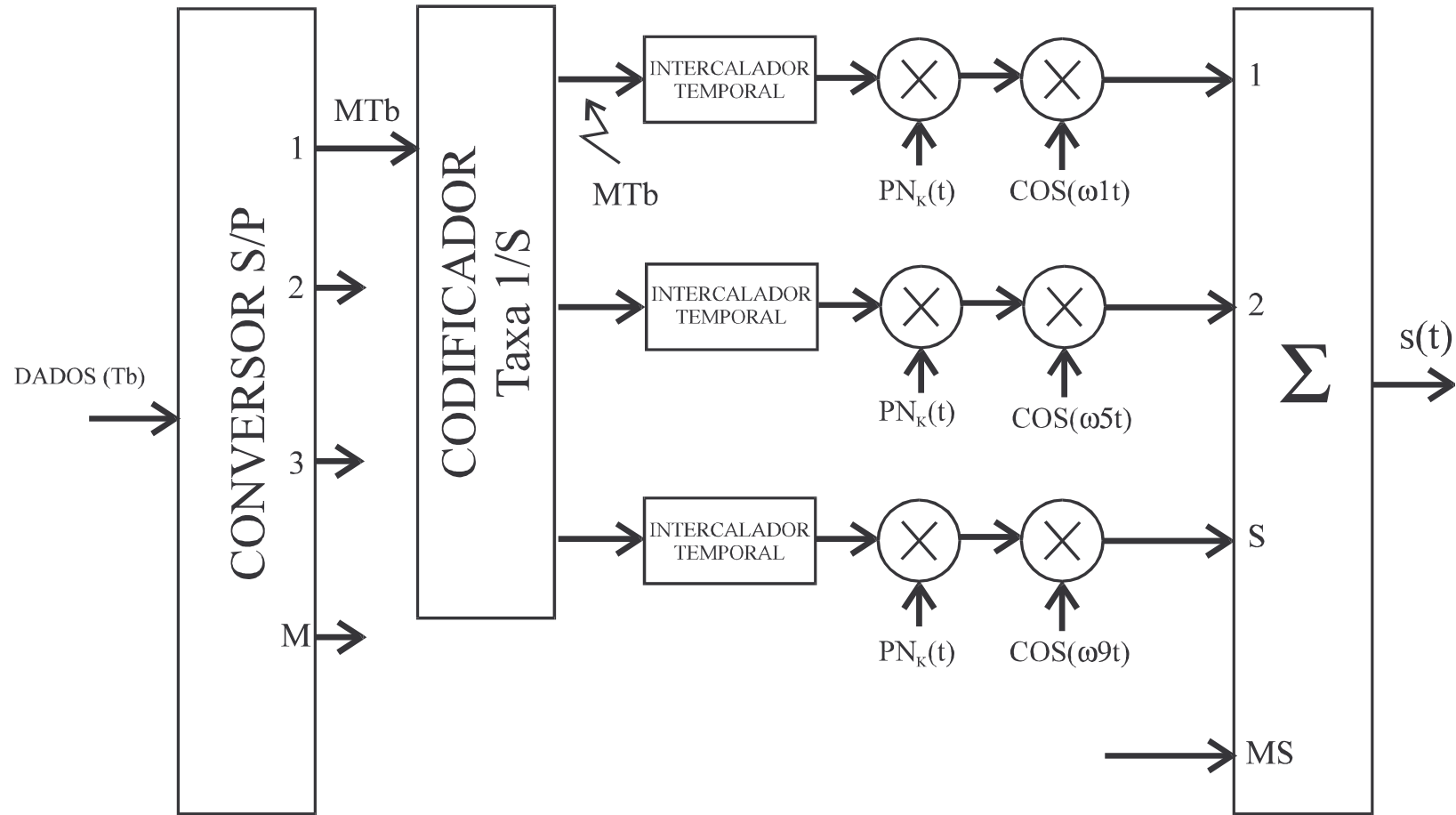
A simulação : utilizando os resultados analíticos
pôde-se simular o sistema em várias configurações.



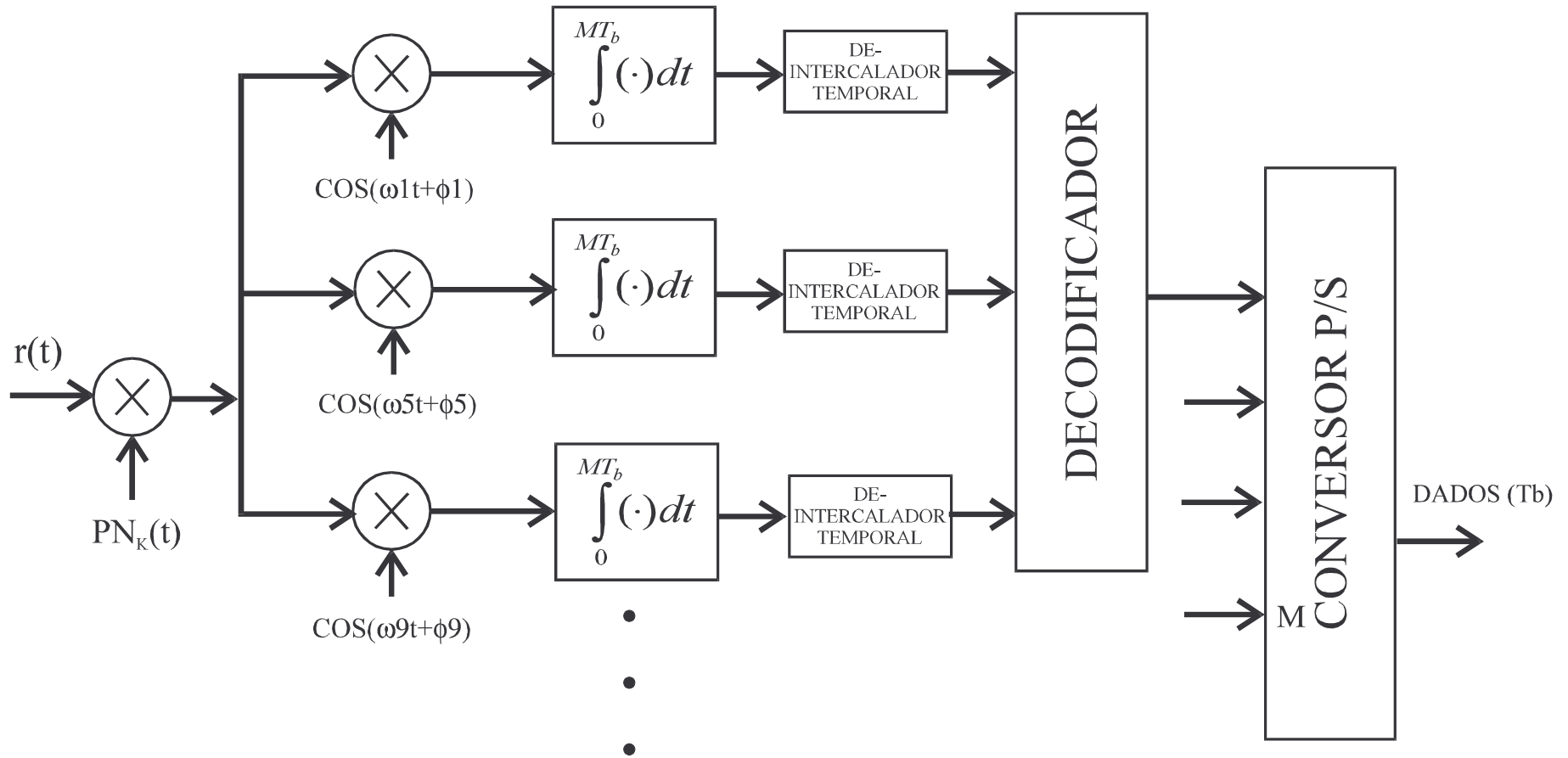
Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 1: um resultado da simulação



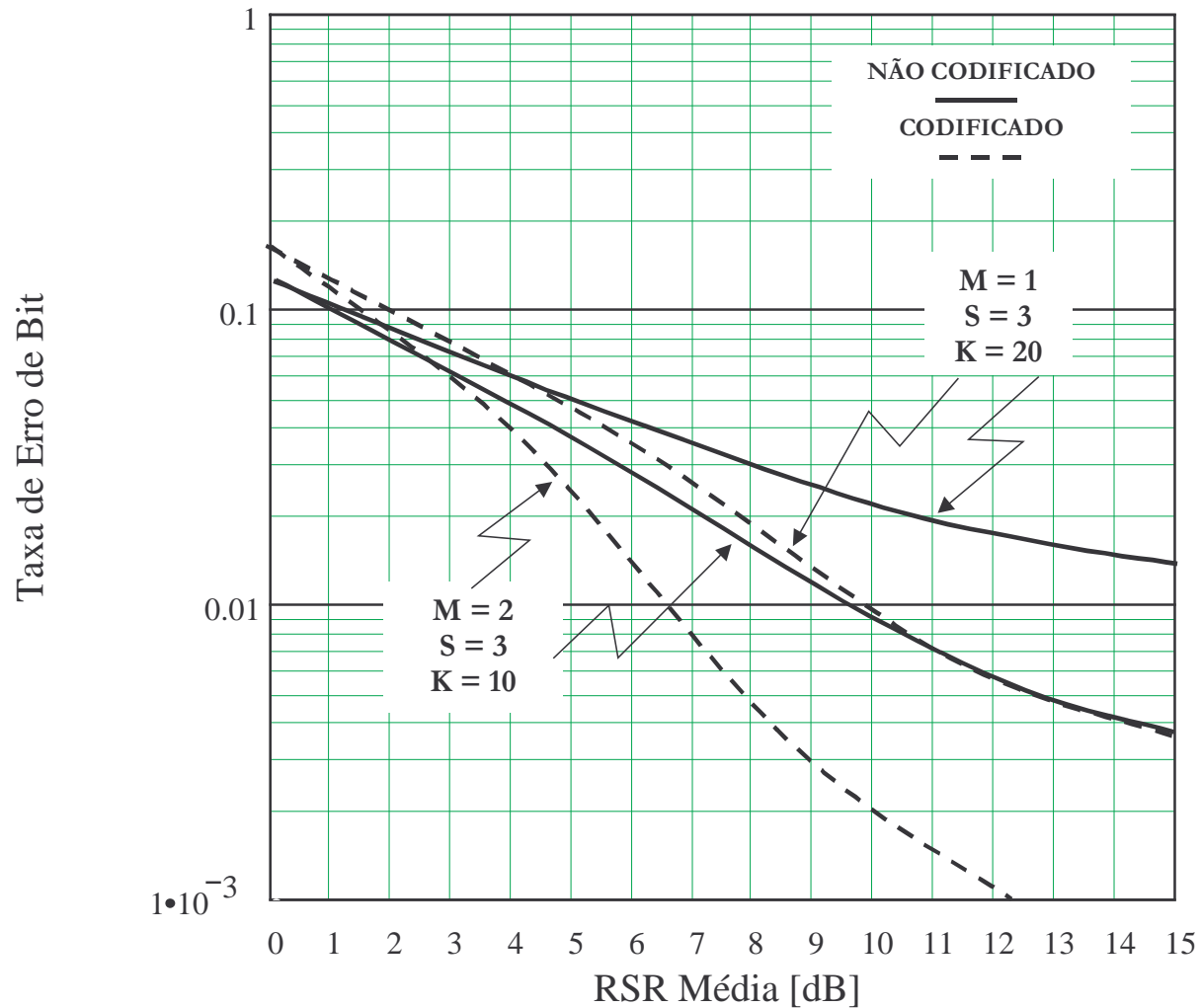
Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 2: transmissor



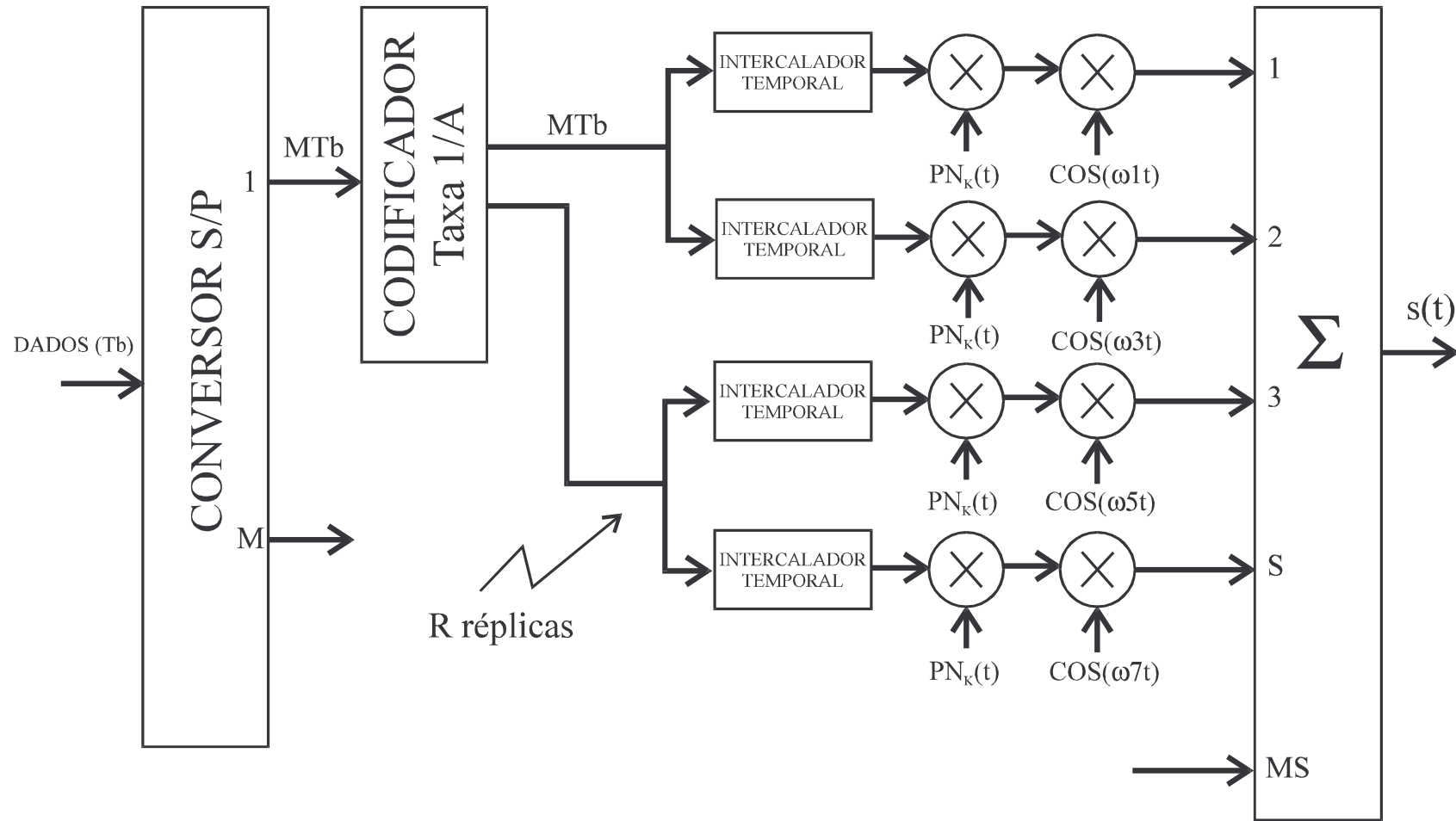
Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 2: receptor



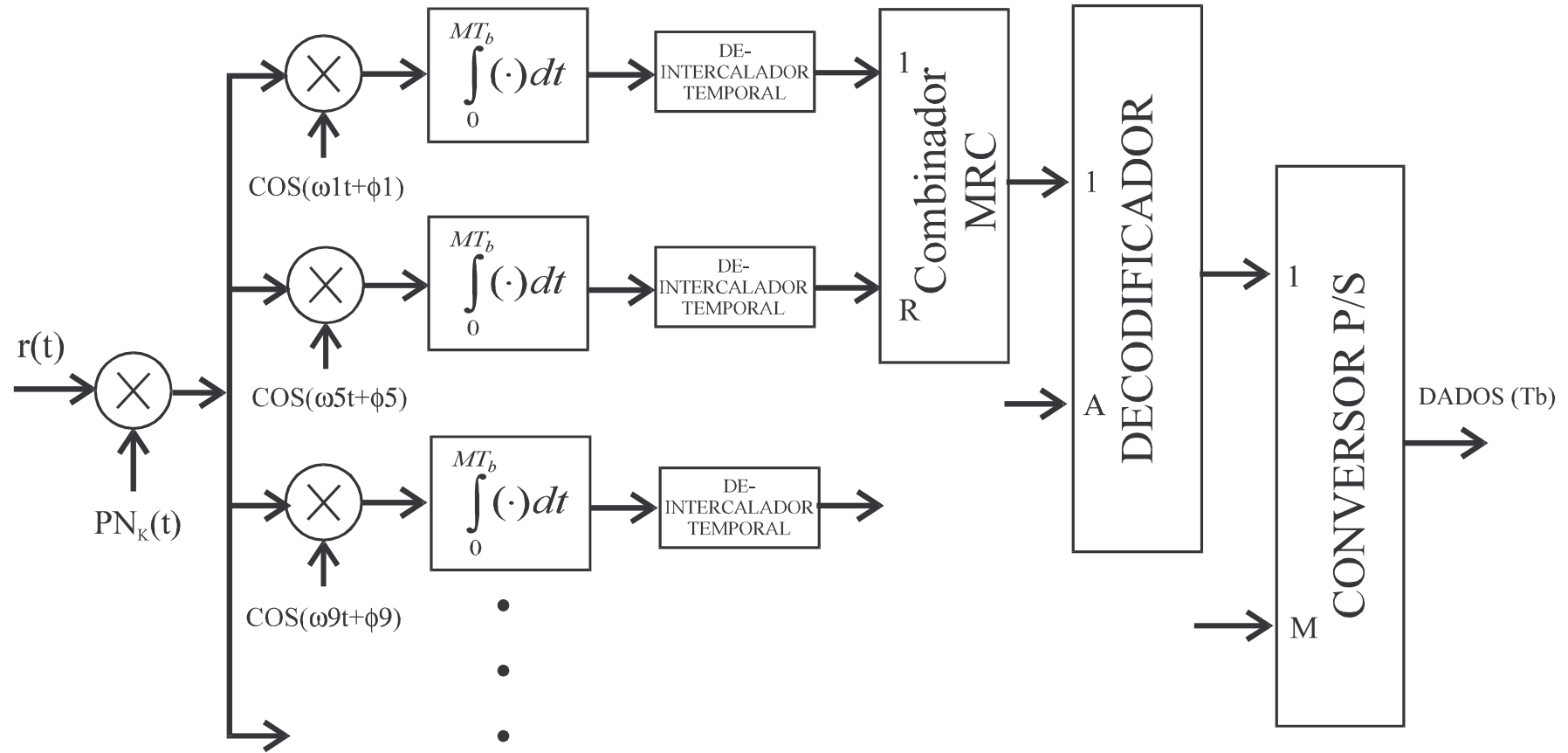
Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 2: um resultado da simulação



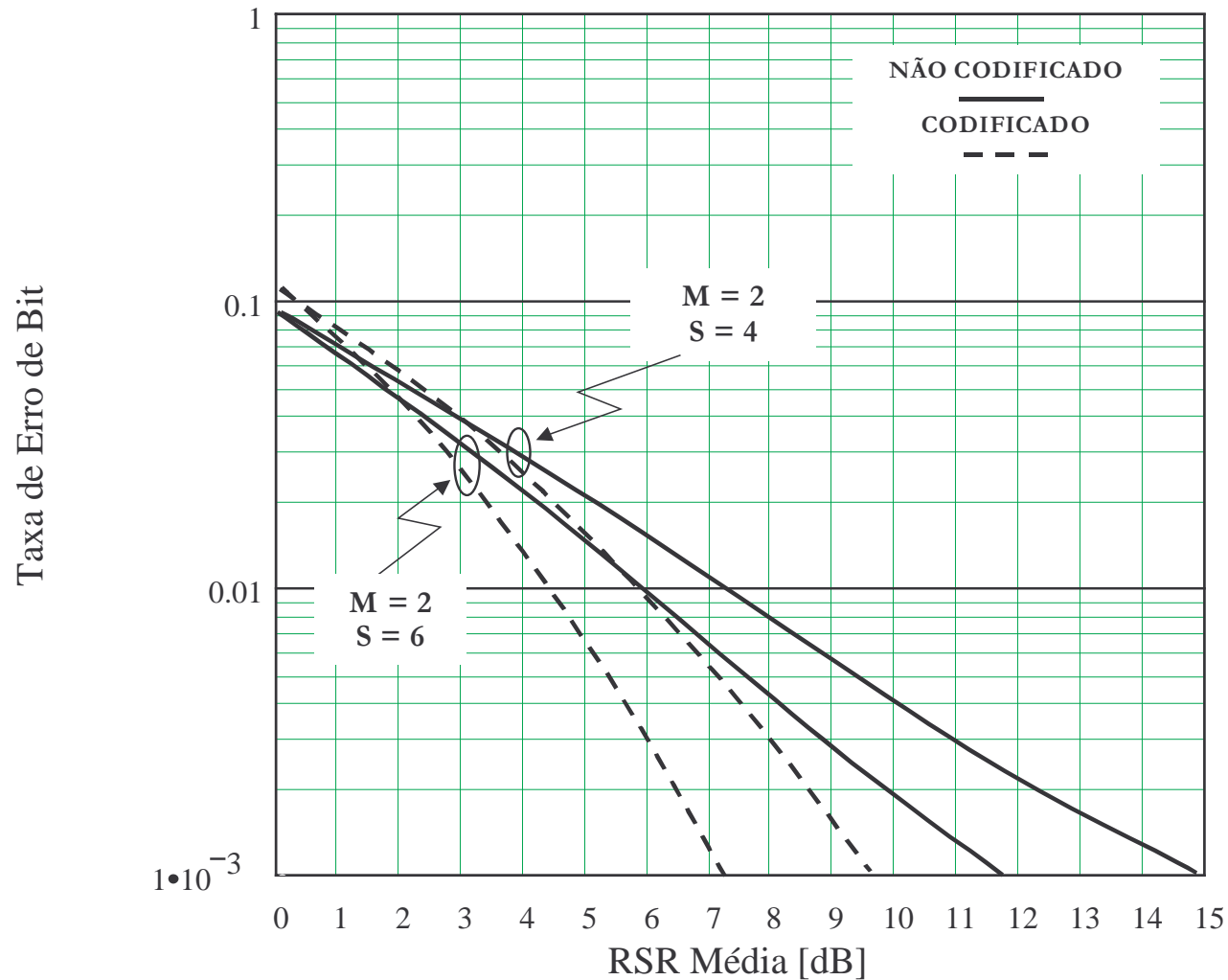
Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 3: transmissor



Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 3: receptor



Sistema MC-DS-CDMA, esquema de codificação 3: um resultado da simulação



Os estudos para o Doutorado - algumas constatações

- Há poucos estudos que consideram o uso de modulação e detecção diferencial para sistemas multiportadoras, dentre eles podendo ser destacados: [Max96], [Max97b].
- Há relativamente poucos estudos que analisam o desempenho de sistemas multiportadoras com codificação de canal, dentre eles podendo ser destacados: [Row98], [Row99a], [Row99b], [Row95], [Faz93], [Max96], [Max97a], [Max97b], [Sti97a], [Sti97b], [Jun97], [San96], [Och97].
- Poucos estudos abordam questões relativas à capacidade do canal com multiportadoras, dentre eles podendo ser destacados: [Gol00], [Big98], [Lee90].
- Não foi identificado nenhum estudo que procure otimizar o processo de codificação de canal de forma que o desempenho do sistema se aproxime da capacidade do canal multiportadoras.

Os estudos para o Doutorado - algumas constatações

- Há casos onde se torna analiticamente inviável se determinar expressões axatas para a probabilidade de erro em alguns sistemas de comunicação para um determinado esquema de codificação de canal. Nesses casos, o uso de limitantes de probabilidade de erro representam uma alternativa para análise do desempenho do sistema [Jam94; p. 44], [Pro95; p. 390].
- A repetição de bits codificados de forma convolucional equivale ao aumento, na mesma ordem de grandeza, da distância mínima do código utilizado [Pro95; p. 813].
- A diversidade convencional pode ser vista como uma forma de codificação trivial (código de repetição) e a combinação como uma forma de decodificação suave. O uso de codificação não trivial ao invés de repetição pode levar a grandes acréscimos de desempenho em canais com desvanecimento [Pro95; p. 806].

Os estudos para o Doutorado - algumas constatações

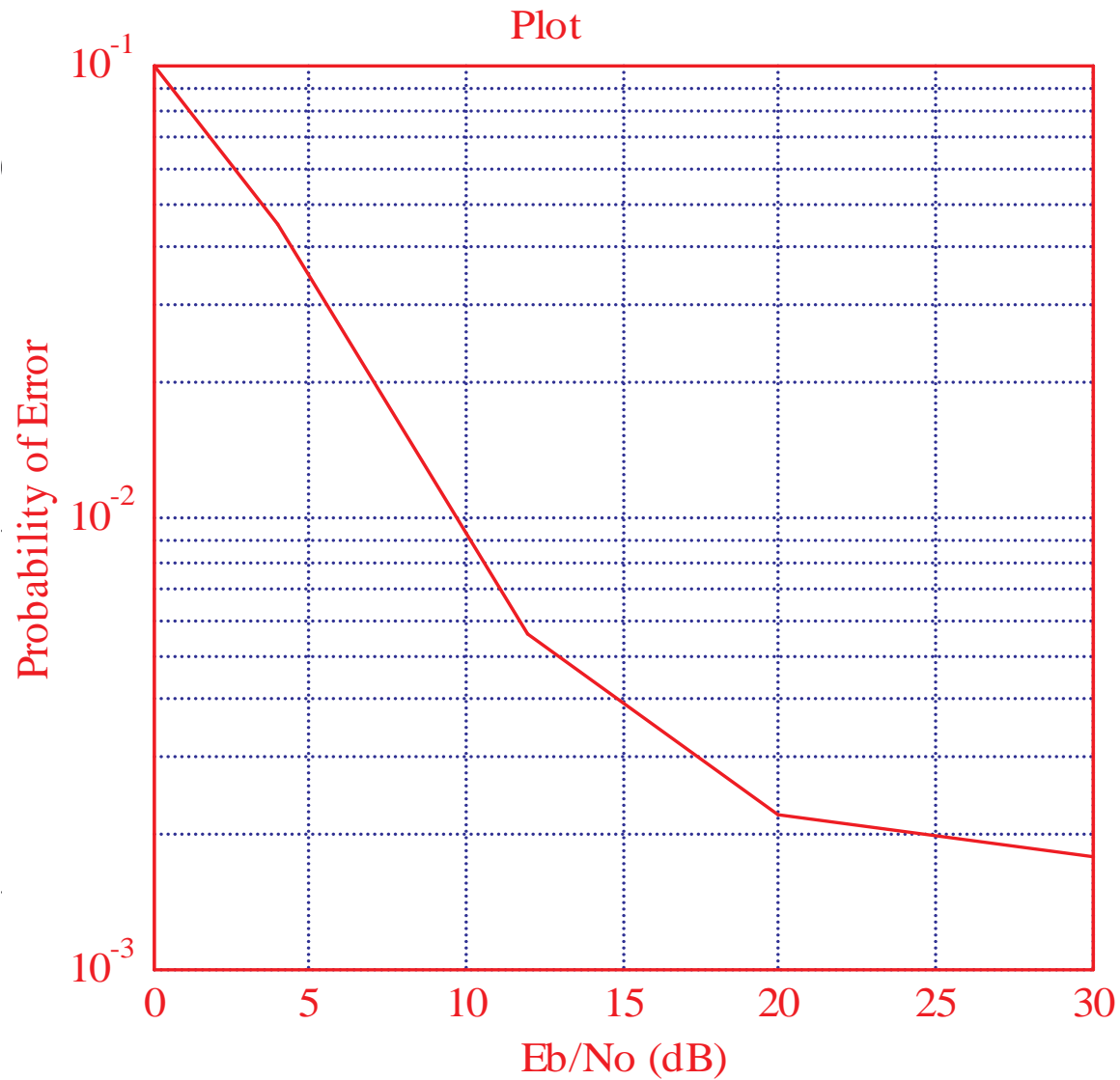
- A diferença em desempenho entre o uso de *hard* x *soft* decision aumenta dramaticamente se o canal é um canal com desvanecimento Rice ou Rayleigh (AWGN, típicos 3dB; Rayleigh, possível 9dB ou mais [Wic95; p. 301]).
- Um receptor RAKE de N taps tem desempenho inferior, em termos de ganho de diversidade, se comparado com um sistema MC com N portadoras [Row98].
- Devido ao reduzido ganho de desempenho conseguido com o aumento da ordem de diversidade além de 4, quando são utilizadas mais de 4 portadoras em um sistema MC faz sentido transmitir diferentes símbolos codificados em diferentes portadoras [Row98].
- Sistemas CDMA Multiportadoras com codificação de canal e *interleaving* de bit codificado raramente foram investigados [Kai98; p. 13].

Os estudos para o Doutorado - algumas constatações

- São poucas as investigações sobre desempenho de sistemas com multiportadoras que permitem uma justa comparação entre as várias propostas. O uso de um modelo de canal amplamente aceito pode levar a essa possibilidade de comparação justa [Kai98; p. 27].
- Além do modelo de canal utilizado nas análises, a real influência no desempenho do sistema devido aos processos de detecção, decodificação e estimação de canal são tópicos a serem considerados. Uma abordagem ampla nesse sentido pode ser encontrada em [Kai98].
- A implementação de um sistema MC-DS-CDMA para simulação computacional se torna naturalmente cada vez mais complexa, à medida que certas sofisticacões são incluídas. A utilização de um software de simulação de sistemas em nível de blocos funcionais parece ser uma alternativa para dar maior flexibilidade a essas implementações, apesar do preço a ser pago: aumento no tempo de simulação.

O trabalho de Doutorado - intensões

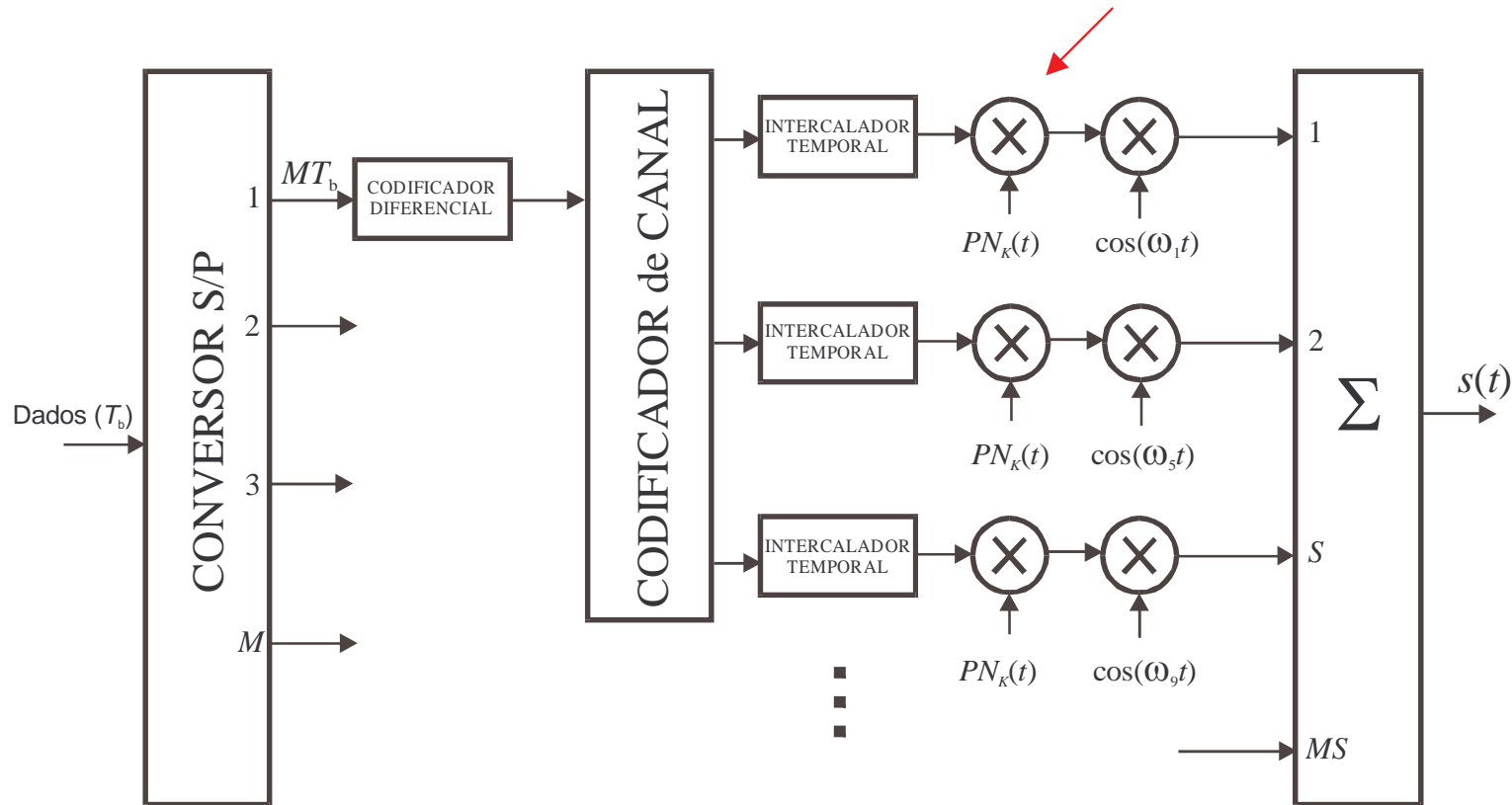
- Uso de PSK diferencial ao invés de PSK coerente. Acreditamos que o desempenho final possa ser aproximadamente o mesmo e a complexidade reduzida devido à não exigência de estimação do canal para detecção coerente.
- Uso do *software* de simulação VisSim/Comm, da empresa Visual Solutions Inc., para simular o sistema e estimar a taxa de erro de bit versus relação sinal-ruído média.
- Realizar investigações analíticas de forma a encontrar limitantes de probabilidade de erro com o uso do esquema de codificação 2, com Codificação Convolutional (ou Turbo) e Decodificação de Viterbi (ou Iterativa) e/ou
- Realizar investigações analíticas de forma a encontrar a capacidade do canal com multiportadoras considerado e procurar por um esquema de codificação de canal que leve o desempenho do sistema próximo à essa capacidade de canal.



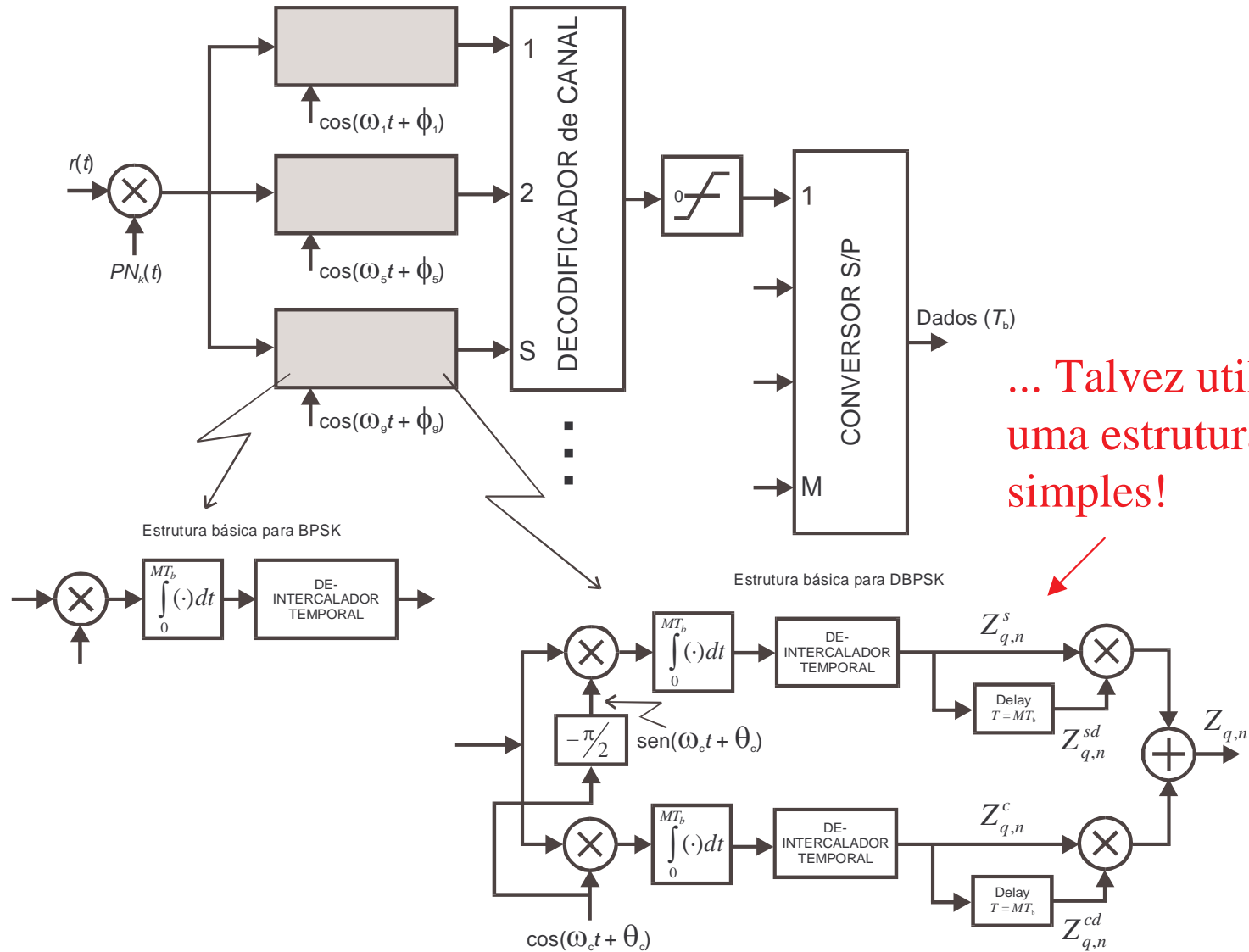
**Um resultado com
o software
VisSim/Comm
para o sistema
MC-DS-CDMA
original [Sou96;
fig. 7, p. 365,
M=S=3]**

O trabalho de Doutorado - transmissor

... Talvez utilizando espalhamento no domínio da frequência!



O trabalho de Doutorado - receptor



Referências

- [Big98] Biglieri, E., Proakis, J., Shamai, S., “Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, No. 6, October 1998.
- [Bin90] Bingham, John A. C., “Multicarrier Modulation for Data Transmission” An Idea Whose Time Has Come”, *IEEE Communications Magazine*, May 1990.
- [Cio9X] Cioffi, John M., “A *Multicarrier Primer*“.
- [Día98] Díaz, Pilar and Agustí, Ramón, “The Use of Coding and Diversity Combining for Mitigating Fading Effects in a DS/CDMA System”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, No. 1, pp. 95-102, February 1998.
- [Faz00] Fazel, Khaled and Kaiser, Stefan (editors) “*Multi-Carrier Spread Spectrum & Related Topics*”: Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 2000.

Referências

- [Faz93] Fazel, K. and Papke, L., “On the Performance of Convolutionally-Coded CDMA/OFDM for Mobile Communication System”, in *Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC’93)*, Yokahoma, Japan, pp.468-472, September 1993.
- [Faz97] Fazel, Khaled and Fettweis (editors), Gerhard P., “*Multi-Carrier Spread Spectrum*”: Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1997.
- [Fet0X] Fettweis, Gerhard. and Nahler, Achim, “Multi-Carrier Spread Spectrum”, *Chapter 8 of a book to be edited*, 200X.
- [Gal68] R. G. Gallager, “*Information Theory and Reliable Communication*”: John Wiley & Sons, 1968.
- [Ger86] Geraniotis, E. A., “Performance of Noncoherent Direct-Sequence Spread-Spectrum Communications Over Specular Multipath Fading Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM. 34, No.3, March 1986.

Referências

- [Gol00] Goldfeld, Lev and Lyandres, Vladimir, “Capacity of the Multicarrier Channel with Frequency-Selective Nakagami Fading”, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E83-B, No. 3, March 2000.
- [Gui98] Guimarães, D. A., “Coding Schemes for a DS-CDMA System with Orthogonal Carriers”, M. Sc. Dissertation (original title in Portuguese: *Esquemas de Codificação para um Sistema DS-CDMA com Portadoras Ortogonais*): FEEC – UNICAMP. Campinas, SP, June 1998.
- [Har96] Hara, Shinsuke and Prasad Ramjee, “An Overview of Multi-Carrier CDMA”, *IEEE ISSSTA '96*, Mainz, Germany, 1996.
- [Har97] Hara, Shinsuke and Prasad Ramjee, “ Overview of Multicarrier CDMA”, *IEEE Communications Magazine*, December, 1997.
- [Hay01] Haykin, Simon, “*Communication Systems*”, 4th. Edition: John Wiley and Sons. USA, 2001.

Referências

- [ITU96] Question ITU-R 39/8, TG 8/1, *Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000/FPLMTS*, June 1996.
- [Jam94] Jamali, S. Hamidreza and Le-Ngoc, Tho, “*Coded Modulation Techniques for Fading Channels*”: Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 1994.
- [Jun97] Jung, P, Berens, F., and Plechinger, J., “Performance of Multicarrier Joint Detection CDMA Mobile Communications Systems”, in *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '97)*, Phoenix, USA, pp. 1892-1896, May 1997.
- [Kai98] Kaiser, Stefan, “*Multi-Carrier CDMA Mobile Radio Systems – Analysis and Optimization of Detection, Decoding and Channel Estimation*”, Ph. D. Thesis: VDI Verlag GmbH. Düsseldorf, 1998.
- [Kav87] Kavehrad, M., “Direct-Sequence Spread Spectrum with DPSK Modulation and Diversity for Indoor Wireless Communications”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM. 35, No.2, February 1987.

Referências

- [Kon96] Kondo, Shiro and Milstein, Laurence B., “Performance of Multicarrier DS CDMA Systems”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, No. 2, February 1996.
- [Lee90] W.C. Y. Lee, “Estimate of channel capacity in Rayleigh fading environment”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.39, No.3, pp. 187-189, August 1990.
- [Lin97] Linnartz, J. P., “*Wireless Communication - The Interactive Multi-Media CD-ROM*”: Baltzer Science Publishers. Amsterdam, 1997.
- [Mas95] Massey, J. L., “Towards an Information Theory of Spread-Spectrum Systems”, *S.G. Glisic and P. A. Leppänen (eds.), Code Division Multiple Access Communications*, pp. 29-46, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [Mat99] Matsutani, Hideyuki and Nakagawa, Masao, “Multi-Carrier DS-CDMA Using Frequency Spread Coding”, *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol. E82-A, No. 12, December 1999.

Referências

- [Max96] Maxey, J. J. and Ormondroyd, R. F., “Low-Rate Orthogonal Convolutional Coded DS-CDMA Using Non-Coherent Multi-Carrier Modulation Over AWGN and Rayleigh Faded Channel”, in *Proceedings IEEE Fourth International Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications (ISSSTA '96)*, Mainz, Germany, pp. 575-579, September 1996.
- [Max97a] Maxey, J. J. and Ormondroyd, R. F., “Multi-Carrier CDMA Using Convolutional Coding and Interference Cancellation over Fading Channels”, in *Proceedings First International Workshop on Multi-Carrier Spread-Spectrum*, Oberpfaffenhofen, Germany, pp. 89-96, April 1997.
- [Max97b] Maxey, J. J. and Ormondroyd, R. F., “Non-Coherent Differential Encoded Multi-Carrier SS Modulation Schemes Using Low-Rate Convolutional Coding in Frequency Selective Rayleigh Fading”, in *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '97)*, Phoenix, USA, pp. 2045-2046, May 1997.

Referências

- [Och97] Ochiai, Hideki and Imai, Hideki, “Block Coding Scheme based on Complementary Sequences for Multicarrier Signals”, *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol. E80-A, No. 11, November 1997.
- [Omu82] Omura, J. K. and Levitt, B. K., “Coded Error Probability Evaluation for Antijam Communication Systems”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-30, No. 5, pp. 896-903, May 1982.
- [Pap91] Papoulis, Athanasios, “*Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*”, 3rd edition: McGraw Hill, USA, 1991.
- [Pro95] Proakis, J. G., “*Digital Communications*”, 3rd edition: McGraw Hill. New York, 1995.
- [Pur77a] Pursley, Michael B., “Performance Evaluation for Phase-Coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communication – Part I: System Analysis”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. Com-25, No. 8, August 1977.

Referências

- [Pur77b] Pursley, Michael B. and Sarwate, Dilip V., “Performance Evaluation for Phase-Coded Spread-Spectrum Multiple-Access Communication – Part II: Code Sequence Analysis”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. Com-25, No. 8, August 1977.
- [Row95] Rowitch, Douglas N. and Milstein, Laurence B., “Coded Multicarrier Code Division Multiple Access”, in *Proceedings 1995 Int. Symp. Information Theory*, Whistler, BC, Canada, pp. 23, September 1995.
- [Row98] Rowitch, Douglas N., “Convolutional and Turbo Coded Multicarrier Direct Sequence CDMA, and Applications of Turbo Codes to Hybrid ARQ Communication Systems”, *Ph. D. Thesis*, University of California, San Diego, USA, 1998.
- [Row99a] Rowitch, Douglas N. and Milstein, Laurence B., “Convolutionally Coded Multicarrier DS-CDMA Systems in a Multipath Fading Channel – Part I: Performance Analysis”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, No. 10, October 1999.

Referências

- [Row99b] Rowitch, Douglas N. and Milstein, Laurence B., “Convolutionally Coded Multicarrier DS-CDMA Systems in a Multipath Fading Channel – Part II: Narrow-Band Interference Suppression”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, No. 11, November 1999.
- [San96] Sanada, Y. and Nakagawa, M. “A Multiuser Interference Cancellation Technique Utilizing Convolutional Codes and Orthogonal Multicarrier Modulation for Wireless Indoor Communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, No. 8, pp. 1500-1509, October 1996.
- [Sar95] Sari, Hikmet, Karam, Georges, and Jeanclaude, Isabelle, “Transmission Techniques for Digital Terrestrial TV Broadcasting”, *IEEE Communications Magazine*, February 1995.
- [Sou96] Sourour, E. A. and Nakagawa, M., “Performance of Orthogonal Multicarrier CDMA in a Multipath Fading Channel”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, No. 3, pp. 356-367, March 1996.

Referências

- [Ste99] Steendam, H. and Moeneclaey, M., “Analysis and Optimization of the Performance of OFDM on Frequency-Selective Time-Selective Fading Channels”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, No. 12, pp. 1811-1819, December 1999.
- [Sti97a] Stirling-Gallacher, R. A. and Povey, G. J. R., “Different Channel Coding Strategies for OFDM-CDMA”, in *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '97)*, Phoenix, USA, pp. 845-849, May 1997.
- [Sti97b] Stirling-Gallacher, R. A. and Povey, G. J. R., “Performance of a OFDM-CDMA System with Orthogonal Convolution Coding and Interference Cancellation”, in *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '97)*, Phoenix, USA, pp. 860-864, May 1997.
- [Tuf98] Tufvesson, Fredrik, “Channel Related Optimization of Wireless Communication Systems“, *Series of Licentiate and Doctoral Theses*, no. 3, ISSN 1402-8662, Department of Applied Electronics, Lund University, Lund, Sweden, February 1998.

Referências

- [Van95] Vandendorpe, L., “Multitone Spread Spectrum Multiple Access Communications System in a Multipath Rician Fading Channel”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, No. 2, May 1995.
- [Vit95] Viterbi, J. G., “*CDMA – Principles of Spread Spectrum Communications*”: McGraw-Hill, 1995.
- [Wan00] Wang, Zhengdao and Giannakis, Georgios B., “Wireless Multicarrier Communications” *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 17, No. 3, pp. 29-48, May 2000.
- [Wei71] Weinstein, S. B. and Ebert, P. M., “Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform” *IEEE Transactions on Communications Technology*, vol. 19, pp. 628-634, October 1971.
- [Wic95] Wicker, Stephen B., “*Error Control Systems for Digital Communication and Storage*”: Prentice Hall. New Jersey, 1995.

Referências

- [Woz65] Wozenkraft, John M. and Jacobs, Irwin M., “*Principles of Communications Engineering*”: John Wiley and Sons, 1965.
- [Yee93] Yee, N., Linnartz, J. P. and Fettweis, G., "Multi-Carrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks", *Proceedings PIMRC '93*, Yokohama, Japan, pp. 109-113, 1993.
- [Zou95] Zou, William Y. and Wu, Yiyan, “COFDM: And Overview”, *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 11, No. 1, March 1995.