

UMA FORMA ALTERNATIVA PARA O ESTUDO DA TÉCNICA DE SINALIZAÇÃO DE RESPOSTA PARCIAL SOB O PONTO DE VISTA DE SUA IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Bruno Augusto Pereira¹ e Dayan Adionel Guimarães²

Abstract — *In the context of Digital Communication studies, this paper presents a model for the study of partial response signaling that better suits the practical implementation aspects of the technique. In this model, the joint frequency response of the transmit filter, the receive filter and the channel were considered separately as a cascade of the pulse-shaping filter, the channel filtering effect, the AWGN noise and the matched filter. The proposed model seems to have a more didactical appeal than the model conventionally used in the literature, since from this model it is possible to have an immediate visualization of the system implementation. The simulation results presented in this work show a very close agreement with theoretical results, indicating the validity of the model and the applicability of the conclusions drawn from this model and from its practical implementation aspects.*

Palavras-chaves — *codificação correlativa, comunicação digital, sinalização de resposta parcial e filtro casado.*

INTRODUÇÃO

Entre os vários quesitos associados à elaboração de projetos de sistemas de comunicação digital, a necessidade de se transmitir informações a velocidades cada vez maiores e em bandas cada vez menores pode ser considerada como primeiro objetivo em quase todos os casos. A técnica ‘Codificação Correlativa’ ou ‘Sinalização de Resposta Parcial’ está relacionada com esta questão e é freqüentemente abordada em estudos de comunicações digitais. Com o uso de Codificação Correlativa se pode transmitir, em banda base, R símbolos por segundo em um canal limitado em $R/2$ Hz [5], como consequência da inserção de uma quantidade controlada de interferência intersimbólica no transmissor de tal maneira que esta possa ser completamente removida no receptor. Com esta técnica também se consegue detectar erros sem inserção de redundância no sinal de informação [8]. A sinalização de

resposta parcial pode ser implementada de muitas maneiras, denominadas ‘classes’. Cada classe tem sua própria característica, principalmente em termos de densidade espectral de potência [7], fazendo com que cada uma melhor se adeqüe a uma determinada aplicação, dependendo da resposta em freqüência do canal.

A abordagem normalmente adotada na literatura apresenta os conceitos associados à sinalização de resposta parcial através do modelamento do filtro de transmissão, da resposta em freqüência do canal e do filtro de recepção em um único sistema linear. Para analisar o sistema de comunicação sob o efeito de ruído, os autores usualmente o adicionam depois desta resposta conjunta, como mostrado na Figura 1.

Embora o modelo mostrado na Figura 1 seja adequado para o objetivo em mente: o estudo sobre codificação correlativa, ele não reflete a situação prática na qual o filtro de transmissão, o canal e o filtro de recepção são entidades separadas. Além disso, para analisar a performance do sistema sob ruído, deve-se utilizar o modelo vetorial de canal, tornando-se necessário estudar este tópico em primeira mão. Isto pode ser interpretado como um obstáculo a mais para que os alunos possam entender a sinalização de resposta parcial e associar o seu entendimento com a implementação prática desta técnica.

Este trabalho apresenta um modelo alternativo para o estudo da teoria de codificação correlativa em coerência com uma situação prática. O modelo proposto é representado pela Figura 2. Esta abordagem parece ser apenas uma outra maneira de analisar o sistema mostrado na Figura 1, do ponto de vista de implementação, e de fato ela é! Mas é válido mencionar que um conjunto bastante significativo de referências consultadas pelos autores não usa esta abordagem quando apresenta os conceitos associados a codificação correlativa [1]-[9] [11]-[24]. A abordagem normalmente adotada é aquela mostrada na Figura 1, de agora em diante chamada de *abordagem convencional*.

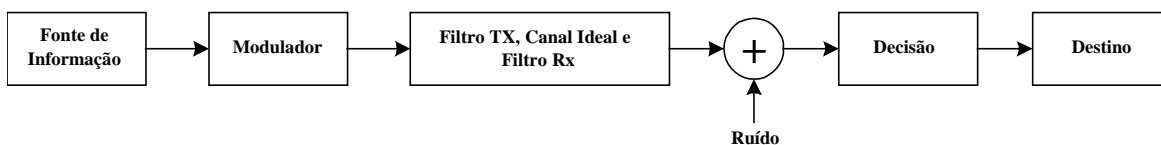


FIGURA 1

MODELO NORMALMENTE ADOTADO NA LITERATURA PARA O ESTUDO DA SINALIZAÇÃO DE RESPOSTA PARCIAL.

¹ Bruno Augusto Pereira, INATEL, Av. João de Camargo, 510, 37540-000, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, bruno_augusto@inatel.br

² Dayan Adionel Guimarães, INATEL, Av. João de Camargo, 510, 37540-000, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, dayan@inatel.br

Somente uma análise similar àquela aqui apresentada foi identificada em [10], embora esta estivesse sendo utilizada nessa referência para definir o então denominado filtro *raiz*

resposta parcial Classe IV é conhecida como sinalização duobinária modificada.

Embora a sinalização de resposta parcial proporcione

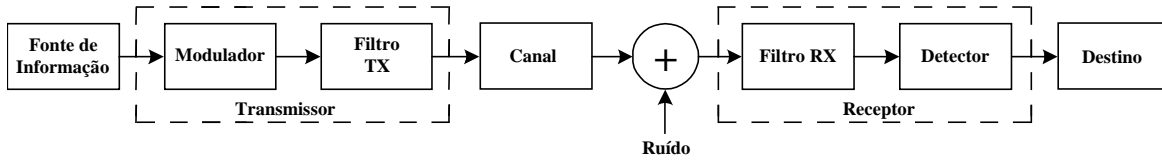


FIGURA 2

MODELO ADOTADO NESTE ARTIGO PARA O ESTUDO DA SINALIZAÇÃO DE RESPOSTA PARCIAL.

de *co-seno elevado* (*root raised cosine*) no contexto de formatação de pulso para transmissão sem interferência intersimbólica, de acordo com o correspondente Critério de Nyquist.

Assim, o objetivo deste trabalho é sugerir o uso do modelo demonstrado pela Figura 2 para o estudo da codificação correlativa. O filtro de transmissão, o canal e o filtro de recepção são modelados separadamente e a performance do sistema é analisada através de simulação. O ruído, como normalmente acontece na prática, é inserido na entrada do receptor. Utilizando o modelo proposto se espera que o entendimento da codificação correlativa possa ser facilitado e os estudantes possam tirar conclusões mais próximas daquelas associadas a uma implementação real da técnica.

UMA REVISÃO SOBRE A SINALIZAÇÃO DE REPOSTA PARCIAL

A interferência intersimbólica é vista, na grande maioria dos casos, como um fenômeno indesejado e que, portanto, deve ser minimizado. Mas, como brevemente mencionado, a técnica de sinalização de resposta parcial usa quantidades controladas de interferência intersimbólica para conseguir atributos vantajosos em um sistema de comunicação, tais como: redução de banda do sinal transmitido, detecção de erro sem inserção de redundância, formatação da densidade espectral de potência do sinal transmitido em função do canal a ser utilizado, etc.

Um esquema generalizado de sinalização de resposta parcial pode ser observado na Figura 3 [1], onde o 'canal ideal' tem uma resposta em frequência $H_{\text{NYQUIST}}(f)$ plana na banda entre $\pm R_b/2$ Hz, sendo R_b a taxa de bits ou de símbolos em uma sinalização binária.

O esquema ilustrado na Figura 3 é capaz de implementar as diversas classes de sinalização de resposta parcial, alterando-se o peso das tomadas $w_0, w_1, w_2, \dots, w_{N-1}, w_{N-2}$. A Tabela 1 apresenta as configuração para diferentes classes de sinalização de resposta parcial segundo ilustrado na Figura 3.

Como exemplo, a sinalização de resposta parcial Classe I é conhecida como sinalização duobinária e a sinalização de

atributos desejáveis a um sistema de comunicação, esta também exige uma maior relação sinal-ruído para que se mantenha a probabilidade de erro de símbolo, conforme será observado posteriormente.

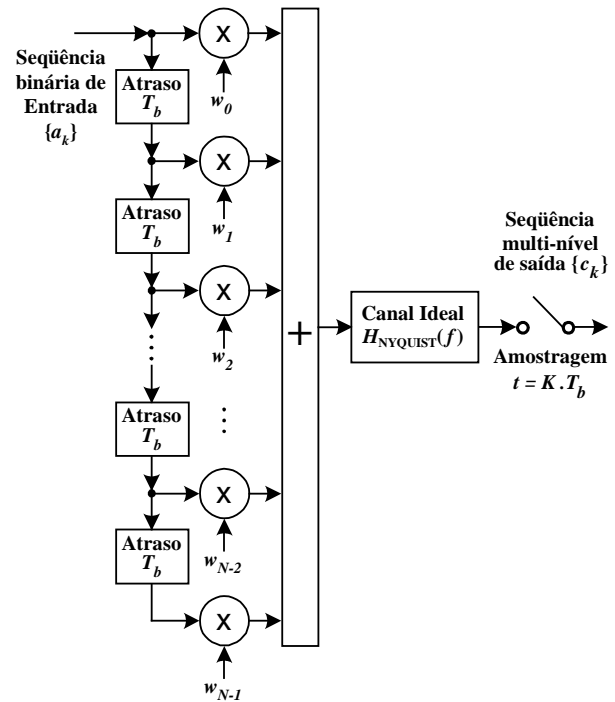


FIGURA 3

ESQUEMA DE SINALIZAÇÃO DE RESPOSTA PARCIAL GENERALIZADO.

TABELA 1

DIFERENTES CLASSES DE SINALIZAÇÃO DE RESPOSTA PARCIAL						
Tipo de Classe	N	w ₀	w ₁	w ₂	w ₃	w ₄
I	2	1	1			
II	3	1	2	1		
III	3	2	1	-1		
IV	3	1	0	-1		
V	5	-1	0	2	0	-1

UM ESTUDO DO CASO: A SINALIZAÇÃO DUOBINÁRIA

Como comentado anteriormente, a teoria prevê várias configurações para a codificação correlativa, configurações estas denominadas *classes* [1]. Cada classe possui

Embora a resposta em fase conjunta não seja igual a $\arg[H_1(f)]$, devido à influência da resposta em fase do canal, isto não afetará o desempenho do sistema de comunicação como um todo, uma vez que o efeito desta diferença acarretaria somente diferentes atrasos provocados no sinal ao longo do sistema.

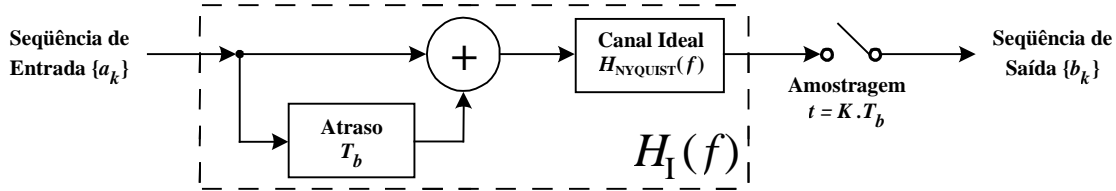


FIGURA 4
SISTEMA DE SINALIZAÇÃO DUOBINÁRIO.

características que a tornam mais adequada a uma aplicação específica. A 'sinalização duobinária' ou 'sinalização de resposta parcial Classe I' será a considerada como estudo de caso neste trabalho, para uma transmissão em banda-base. Verificar-se-á se os conceitos e interpretações registrados aqui podem ser estendidos para o estudo de outras classes de sinalização de resposta parcial.

O modelo convencional de um sistema duobinário é apresentado na Figura 4, no qual o bloco destacado através de uma linha tracejada contém o chamado codificador duobinário [1]. O 'canal ideal' mostrado na Figura 4 é idêntico ao da Figura 3. A resposta em frequência do codificador duobinário é dada por [1]:

$$H_1(f) = \begin{cases} 2 \cos(\pi f T_b) \exp(-j\pi f T_b), & |f| \leq \frac{1}{2T_b} \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Em um sistema de comunicação analisado de acordo com o modelo apresentado na Figura 1, $H_1(f)$ representa a resposta em frequência conjunta do filtro de transmissão, do filtro de recepção e do canal.

Admite-se aqui uma resposta em magnitude plana e uma resposta em fase linear para o canal na banda ocupada pelo sinal transmitido³. Admite-se também que o modulador (observar Figura 2) gera pulsos de estreita duração e amplitudes ± 1 . Dessa forma o filtro de transmissão atua como um filtro de formatação de pulsos sem a necessidade de correção do tipo 'sinc inverso'. Levando em conta a teoria de filtros casados, cogita-se que a magnitude da resposta em frequência para os filtros de transmissão e recepção seja a raiz quadrada da resposta em magnitude $|H_1(f)|$ e suas respostas em fase sejam $\arg[H_1(f)]$ dividido por dois. Neste caso a resposta em frequência conjunta, que corresponderá a associação em cascata do filtro de transmissão, canal e filtro de recepção, será igual a $H_1(f)$.

Assim, a resposta em frequência do filtro de formatação de pulsos no transmissor será igual à resposta em frequência do filtro casado no receptor, e valerá:

$$H_F(f) = \sqrt{H_1(f)} \quad (2)$$

Como $H_1(f)$ é complexa, ou seja, possui uma resposta em fase e em magnitude, podemos representá-la pela seguinte notação:

$$H_1(f) = |H_1(f)| \exp(\arg[H_1(f)]) \quad (3)$$

Então, levando (3) em (2), tem-se:

$$\begin{aligned} H_F(f) &= \sqrt{|H_1(f)| \exp(\arg[H_1(f)])} \\ &= \sqrt{|H_1(f)|} \cdot (\exp(\arg[H_1(f)]))^{1/2} \\ &= \sqrt{|H_1(f)|} \cdot \exp\left(\frac{\arg[H_1(f)]}{2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Portanto a expressão final da resposta em frequência dos filtros de transmissão e recepção, para implementação da sinalização duobinária segundo a teoria de filtros casados será:

$$H_F(f) = \begin{cases} \sqrt{2 \cos(\pi f T_b)} \exp\left(\frac{-j\pi f T_b}{2}\right), & |f| \leq \frac{1}{2T_b} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Assim, supondo um canal livre de interferência intersimbólica, a resposta conjunta do filtro de transmissão, filtro de recepção e canal de comunicação pode ser definida por:

$$H_F(f) \cdot H_F(f) = H_1(f) \quad (6)$$

³ Adotando essa condição desmembra-se a influência do canal de comunicação da análise aqui proposta.

A sinalização de resposta parcial classe I é, então, implementada de acordo com o modelo da Figura 2.

Resta agora verificar se o filtro de recepção é realmente um filtro casado com o formato de pulso de transmissão. Para tanto se tem dois caminhos a tomar: 1) verificar se a resposta ao impulso do filtro de recepção, $h_F(t)$ corresponde à versão espelhada e deslocada⁴ do formato do pulso de transmissão, que também é igual a $h_T(t)$, ou seja, verificar se $h_F(t) = kh_T(T_b - t)$, sendo k uma constante arbitrária; 2) no caso da primeira opção não ser verdadeira, tem-se que verificar se o filtro de recepção maximiza a relação sinal-ruído de pico do pulso de transmissão no momento de decisão, tarefa desempenhada por um filtro casado.

Começando a verificação pela análise da Figura 5, onde $h_I(t)$ é a convolução de $h_F(t)$ com a própria $h_F(t)$ e que também é a transformada inversa de Fourier de $H_I(f)$, observa-se que $h_F(t)$ é igual a sua versão espelhada e deslocada. Então, utilizando filtros de formatação de pulso e de recepção com resposta $h_F(t)$ implementar-se-á a sinalização duobinária utilizando um filtro de recepção casado ao formato do pulso de transmissão $h_T(t)$.

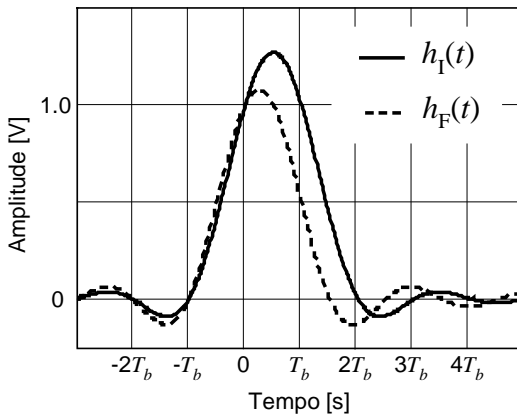


FIGURA 5

RESPOSTA AO IMPULSO DO CODIFICADOR DUOBINÁRIO E RESPOSTA AO IMPULSO DOS FILTROS DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO PARA IMPLEMENTAÇÃO DA SINALIZAÇÃO DUOBINÁRIA.

Como o primeiro caminho se mostrou uma opção verdadeira, não se faz necessário à verificação pelo segundo caminho. Isto não acontece se a mesma análise for feita para a sinalização de resposta parcial classe IV, ou sinalização duobinária modificada. Pode-se verificar que a resposta ao impulso do filtro de recepção não corresponderá ao formato espelhado do pulso de transmissão. Portanto, para esta classe de resposta parcial se faz necessário optar pelo segundo caminho, de forma a se saber se o filtro de recepção maximiza ou não a relação sinal-ruído no momento da decisão. Devido à limitação de espaço, esta análise não será apresentada neste artigo.

⁴ Esse deslocamento na verdade não necessariamente deve ser igual a T , em termos de implementação real, podendo ser simplesmente aquele deslocamento suficiente para tornar causal a resposta do filtro em questão.

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para comprovar a equivalência entre os modelos descritos pelas Figuras 1 e 2 e mostrar que o modelo proposto realmente se aproxima de uma implementação prática, uma simulação desse modelo foi feita e seus resultados foram comparados com resultados teóricos do modelo convencional. Nesta simulação utilizou-se um esquema de pré-codificação diferencial, com o intuito de evitar a propagação de erros no processo de decisão da sinalização duobinária [1]. Este esquema foi modificado de acordo com o modelo mostrado na Figura 2. O modelo proposto foi, então, implementado usando a plataforma *VisSim/Comm 5.0*. O canal foi suposto sem distorção e as respostas em frequência dos filtros de transmissão e recepção foram geradas usando o software *Mathcad 2001i*, de acordo com operações na equação (1). Estas respostas foram importadas do *Mathcad* para o *VisSim/Comm* como arquivos DAT (*file filters*). O ruído foi gerado como uma forma de onda contínua e injetado na entrada do receptor.

A Figura 6 mostra o diagrama de olho do sinal de saída do filtro casado de recepção, revelando um correto funcionamento da simulação, posto que tal diagrama corresponde ao diagrama teórico da sinalização de resposta parcial duobinária com pré-codificação diferencial.

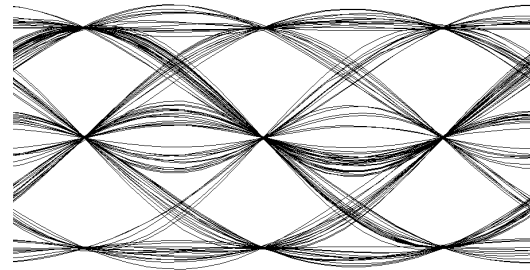


FIGURA 6

DIAGRAMA DE OLHO DO SINAL DE SAÍDA DO FILTRO DE RECEPÇÃO.

Um outro resultado importante de simulação é a estimativa da taxa de erro de símbolo do modelo sob teste. Tal resultado foi obtido para os seguintes valores de E_s/N_0 : 2, 4, 6, 8, 10 e 12 dB. Estes resultados podem ser observados na Figura 7, bem como o desempenho (probabilidade de erro de símbolo *versus* E_s/N_0) teórico da sinalização duobinária com pré-codificação diferencial em banda base. Na Figura 7 também é apresentado o desempenho teórico da sinalização binária antipodal em banda base como referência. De acordo com [10], para a mesma probabilidade de erro de símbolo, são necessários 2,1 dB a mais de potência de transmissão para a sinalização duobinária quando comparada com a sinalização binária antipodal. Como pode ser notado na Figura 7, o resultado de simulação se apresentou muito próximo do resultado teórico, comprovando a validade do modelo proposto e da implementação de sua simulação.

CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um modelo alternativo para o estudo da sinalização de resposta parcial e que melhor representa os aspectos práticos da implementação desta técnica. Neste modelo, a resposta em frequência conjunta correspondente ao filtro de transmissão, ao canal e ao filtro de recepção foi estudada separadamente como a associação em cascata do filtro de formatação de pulsos, do efeito de filtragem do canal e do filtro casado de recepção. O modelo proposto aparentemente possui um maior apelo didático do que o modelo convencionalmente usado na literatura, uma vez que deste modelo é possível se visualizar imediatamente a implementação de um sistema real. Isto se torna particularmente útil quando da apresentação de tal técnica aos estudantes, pois eles terão maiores chances de associação da teoria com a prática.

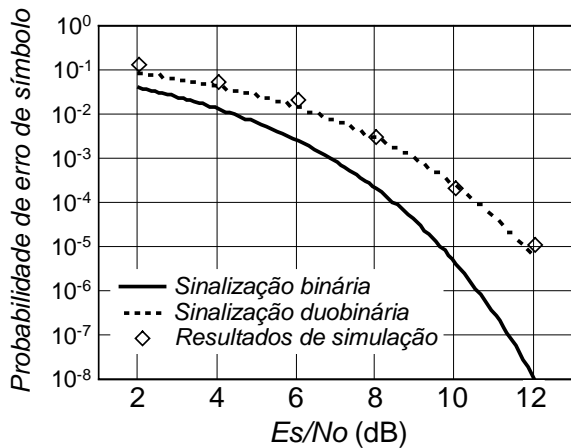


FIGURA 7

DESEMPENHO TEÓRICO DA SINALIZAÇÃO ANTIPODAL BINÁRIA E DUOBINÁRIA EM BANDA BASE E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO PARA A SINALIZAÇÃO DUOBINÁRIA EM BANDA BASE.

Muitos dos resultados de simulação que podem ser obtidos a partir do modelo proposto, dentre os quais alguns foram apresentados neste artigo, dificilmente podem ser observados utilizando-se o modelo convencional, visto que este apresenta uma concordância com uma implementação real somente se for analisado vetorialmente. Os resultados de simulação apresentados neste trabalho também mostram uma grande concordância com os resultados teóricos, demonstrando a validade do modelo e a aplicabilidade nas conclusões obtidas deste modelo e de seus aspectos práticos de implementação.

REFERÊNCIAS

- [1] HAYKIN, S. "Communication Systems", 4th Edition - John Wiley and Sons, Inc.: New York, USA, 2001.
- [2] SKLAR, B. "Digital Communications - Fundamentals and Applications", Prentice Hall, Inc.: New Jersey, USA, 1998.
- [3] PROAKIS, J. G. "Digital Communications", 3rd Edition, McGraw Hill, Inc.: USA, 1995.

- [4] SOUSA, E. S.; PASUPATHY, S. "Pulse shape Design for Teletext Data Transmission", IEEE Transaction on Communications, vol. COM-31, pp.871-878, 1983.
- [5] PASUPATHY, S. "Correlative Coding - A Bandwidth Efficient Signaling Scheme", IEEE Communications Magazine, vol.15, n°. 4, pp. 4-11, 1977.
- [6] KABAL, P.; PASUPATHY, S. "Partial-Response Signaling", IEEE Transactions on Communications, vol.COM-23, pp.921-934, 1975.
- [7] KRETZMER, "Generation of a Technique for Binary Data Communication", IEEE Transactions on Communications Technology, vol. COM-14, pp.67-68, Feb.1966.
- [8] LENDER, A. "Correlative Digital Communication Techniques", IEEE Trans. Communications. Technology., pp. 128-135, Dec. 1964.
- [9] NYQUIST, H. "Certain Topics of Telegraph Transmission Theory", Trans. Inst. Electr. Eng., Vol.47, pp. 617-644, Apr. 1928.
- [10] ZIEMER, R. E.; PETERSON, R. L. "Introduction to Digital Communication", 2nd Edition - Prentice Hall, Inc.: New Jersey, USA, 2001.
- [11] ZIEMER, R. E.; TRANTER, W. H. "Principles of Communications Systems, Modulation and Noise", 3th Edition - Houghton Mifflin Company, Boston, USA, 1990.
- [12] JERUCHIN, M. C.; BALADAN, P.; SHANMUGAN, K. S. "Simulation of Communication Systems" - Plenum Press, New York, USA, 1992.
- [13] WILSON, S. G. "Digital Modulation and Coding" - Prentice Hall, Inc.: New Jersey, USA, 1996.
- [14] BENEDETTO, S.; BIGLIERI E. "Principles of Digital Transmission with wireless applications" - Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, USA, 1999.
- [15] ROHDE, U.; WHITAKER, J. "Communications Receivers DSP, Software Radios and Design", 3rd Edition - McGraw Hill Companies, Inc.: California, USA, 2001.
- [16] SMITH, J. R. "Modern Communication Circuits", 2nd Edition - McGraw Hill Companies, Inc.: New York, USA, 1998.
- [17] YOUNG, P. H. "Electronic Communication Techniques", 4th Edition - Merril, Inc.: 1999.
- [18] ACKENHUSEN, J. G. "Signal Processing Technology and Applications", IEEE Press, 1994.
- [19] SHANMUGAN, K. S. "Digital and Analog Communication Systems", Wiley, 1980.
- [20] YACOUB, M. D. "Foundations of Mobile Radio Engineering" - CRC Press, Inc.: Florida, USA, 1993.
- [21] GIBSON, J. D. "The Mobile Communications HANDBOOK", 2nd Edition - CRC Press LLC.: Florida, USA, 1999.
- [22] STEELE, R. "Mobile Radio Communications" - Pentech Press Limited.: London, UK, 1992.
- [23] DIXON, R. C. "Radio Receiver Design" - Marcel Dekker, Inc.: New York, USA, 1998.
- [24] ROHDE, U. L.; WHITAKER, J.; BUCHER, T. T. N. "Communications Receivers" 2nd Edition - McGraw Hill Companies, Inc.: New York, USA, 1997.