Avaliação de um Sistema COFDM com Espalhamento Espectral por Saltos em Freqüência em Canais com Jamming

Guilherme B. Talhate, Tetsu Gunji, Marcelo S. Pinho
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil

***Resumo*— Este trabalho avalia o desempenho (BER) de um sistema de comunicação COFDM quando o sinal modulado é transmitido através de um canal AWGN com *jamming*. Esta avaliação é feita através de simulação e são utilizados três tipos diferentes de interferência (tonal, com banda limitada e pulsada). Inicialmente, a potência de transmissão é ajustada com base em uma taxa de erro requerida e na existência de ruído branco gaussiano (i.e., sem *jamming*). Uma margem de 5 dB é usada no cálculo desta potência de transmissão. Depois deste cálculo inicial, o *jamming* é adicionado e a potência necessária para romper a taxa de erro desejada é medida. A simulação mostra que a interferência pulsada é a pior e que neste caso uma taxa-*jamming*-sinal de -23 dB é o suficiente para prejudicar a transmissão de dados. Para reduzir o efeito da interferência, este artigo propõe a utilização da técnica de espalhamento espectral por saltos em freqüência. O novo sistema é testado e os resultados de simulação mostram melhorias significativas. Por exemplo, usando um espalhamento de oito vezes, o *jamming* pulsado precisa de -15 dB para afetar a transmissão (i.e., uma melhoria de 8 dB).**

***Palavras-Chave*— cofdm, fhss, jamming**

***Abstract*— This work evaluates the performance (BER) of a communication system using the COFDM technique when the modulated signal is transmitted over an AWGN channel with jamming. This evaluation is measured by the use of computer simulations and it is used three different kinds of interference (tonal, band-limited and pulsed). Initially, the transmitted power is set based on a desired BER and the presence of the white gaussian noise (i.e., with no jamming). A margin of 5 dB is used in the computation of this transmitted power. After this initial design, the jamming is added and the power which turns the BER below its desired value is measured. The simulation shows that the pulsed jamming is the worst and in this case a jamming to signal ratio of -23 dB is enough to disturb the data transmission. To reduce the effect of the interference, this paper proposes the use of the frequency hopping spread spectrum technique (FHSS). A FHSS-COFDM system is tested and simulation results show significant improvements. For exemple, using a spread spectrum of eight times, the pulsed jamming needs -15 dB to affect the transmission (i.e., an improvement of 8 dB).**

***Keywords*— ofdm, fhss, jamming**

I. Introdução

Na última década, o avanço tecnológico na área de processamento da informação fez com que diferentes sistemas utilizados na área de defesa fossem integrados para melhorar a tomada de decisão. Este sistema integrado é composto por vários dispositivos com capacidade de processar, transmitir e/ou receber informação e são chamados de sistemas de C4ISR (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*), vide [1], [2]. Os sistemas de comunicação utilizados devem ser capazes de transmitir em tempo real diferentes tipos de sinais, tais como voz, dados e vídeo, o que implica em altas taxas de transmissão. Além disso, estes sistemas de comunicação precisam ser projetados para operar em ambientes hostis, com a existências de sinais interferentes produzidos com a intenção de inviabilizar a transmissão (i.e., ambiente com presença de *jamming*).

A técnica COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tem sido muito utilizada quando se deseja projetar um sistema de comunicação que opere em faixa larga e com canal seletivo em freqüência. De fato, o padrão europeu para a transmissão de TV digital para equipamentos portáteis (conhecido por DVB-H) [3] e o padrão japonês de transmissão de TV digital [4] são exemplos de sistemas que utilizam esta técnica. Embora o COFDM seja eficiente para este tipo de canal, ele não foi projetado para operar em ambientes com *jamming* e o seu desempenho pode se deteriorar de forma significativa neste caso. Uma das técnicas utilizadas para combater o efeito do *jamming* é o espalhamento espectral que pode ser por seqüência direta (DSSS — *Direct Sequence Spread Spectrum*) ou por saltos em freqüência (FHSS *Frequency Hopping Spread Spectrum*) [5]. Em [6], é apresentado um sistema de comunicação baseado na técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) com espalhamento espectral por salto em freqüência que pode ser útil para combater o *jamming*.

Este artigo avalia o desempenho de um sistema COFDM com espalhamento espectral por salto em freqüência (FHSS-COFDM), quando o sinal é transmitido através de canais com *jamming*. O sistema COFDM avaliado é baseado no padrão DVB-H e com a técnica de espalhamento espectral proposta em [6]. Três tipos diferentes de *jamming* são avaliados: o tonal, o com banda limitada e o pulsado. Este trabalho está dividido da seguinte forma. A segunda Seção apresenta os modelos de canais com os três tipos diferentes de *jamming*. O sistema FHSS-COFDM é introduzido na Seção 3. Os resultados obtidos para o sistema COFDM e o FHSS-COFDM são apresentados e comparados na Seção 4. Fechando o trabalho, a Seção 5 apresenta as conclusões do artigo.

G. B. Talhate, gtalhate@gmail.com, T. Gunji, tgunji@uol.com.br, M. S. Pinho, mpinho@ieee.org

II. Canais com Jamming

Na área de defesa, os sistemas de comunicação devem ser projetados para operar em ambientes hostis. O *jamming* é um sinal gerado por um inimigo, cuja intenção é prejudicar a comunicação. Na prática, se o sistema de comunicação foi projetado para operar com um modelo de canal pré-estabelecido, a introdução de um novo sinal interferente irá atrapalhar este sistema, podendo inviabilizar a transmissão.

Um dos modelos de canal de comunicação mais simples é o canal com ruído aditivo gaussiano branco (AWGN — *Additive White Gaussian Noise*). Conforme apontado em [7], embora este modelo pareça bastante limitado, seu estudo é importante pois em algumas aplicações, este tipo de ruído é a principal imperfeição do canal. Este trabalho utiliza o modelo de canal AWGN com a adição de *jamming*. A Fig. 1 ilustra o modelo geral de canal de comunicação analisado neste artigo. Nesta Figura, o sinal modulado $s(t)$ é aplicado na entrada do canal produzindo na saída um sinal $r(t)$ que é dado pela soma do sinal modulado $s(t)$, do AWGN $n(t)$ e do *jamming* $x(t)$. O ruído aditivo gaussiano branco $n(t)$ é um processo estocástico estacionário no sentido amplo, com densidade espectral constante dada por $S_n(f) = \frac{N_0}{2}$. Neste trabalho, são analisados três tipos diferentes de *jamming* $x(t)$: o tonal, o com banda limitada e o pulsado. A descrição destes modelos é apresentada a seguir.

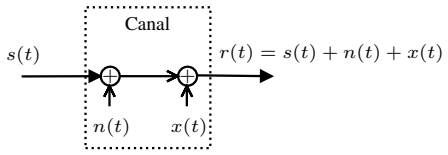


Fig. 1. Canal AWGN com jamming

No modelo de canal com *jamming* tonal, o sinal interferente é uma senóide, i.e., $x(t) = A_x \cos(2\pi f_x t)$, onde A_x é a amplitude e f_x é a freqüência. Neste trabalho, foi utilizado um *jamming* tonal com freqüência fixa.

No segundo modelo utilizado neste trabalho, o sinal interferente é um ruído com densidade espectral de potência constante dentro de uma faixa limitada do espectro. Esta faixa é menor que a utilizada pelo sinal modulado. Portanto, neste modelo $x(t)$ é um processo estocástico estacionário no sentido amplo, com densidade espectral de potência dada por

$$S_X(f) = \begin{cases} \frac{N_j}{2}, & \text{se } |f \pm f_c| \leq B; \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (1)$$

onde f_c é a freqüência central do sinal modulado e B é a largura de banda do sinal interferente.

O último modelo utilizado neste trabalho é o do canal com *jamming* pulsado. Neste caso, o sinal interferente é ruído branco gaussiano só que ele é ligado e desligado com uma certa periodicidade. Na prática, durante o tempo em que o sistema está desligado, ele carrega energia para emitir um ruído com alta potência, dentro do tempo em que está ativo. Seja $w(t)$ um ruído branco gaussiano, com densidade espectral de potência dada por $S_w(f) = \frac{N_j}{2}$. Neste caso, o sinal interferente é dado por $x(t) = w(t)g_{\tau,T}(t)$, onde $g_{\tau,T}(t)$ é um trem de pulsos de largura τ e período T. A partir da definição, é possível notar que dentro de um período, τ é o tempo em que o *jamming* está ativo e $T - \tau$ o tempo em que está desligado.

III. COFDM com Espalhamento Espectral por Saltos em Freqüência

A técnica OFDM permite que um sinal seja transmitido através da utilização de múltiplas portadoras, cada uma delas ocupando uma faixa reduzida do espectro de freqüências. Na prática, a banda disponível B é dividida em N sub-bandas e em cada uma delas, uma portadora é transmitida. Cada uma destas portadoras carrega símbolos a uma taxa N vezes menor que a taxa de símbolo do sistema OFDM. A implementação de um transmissor OFDM pode ser feita através da utilização da IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*), conforme ilustra a Fig. 2, que é uma adaptação da Figura 11.2-4 de [7]. Nesta Figura, os bits de entrada do modulador são aplicados em um conversor serial paralelo, gerando N seqüências de bits. Cada seqüência é aplicada de forma independente na entrada de um modulador (que pode ser o equivalente em banda base de um QAM ou um PSK, por exemplo). O bloco IDFT é utilizado para criar a separação na freqüência das portadoras. Os sinais passam por um conversor paralelo-serial e posteriormente seguem para o conversor digital-analógico. O sinal da saída do conversor é transladado para a freqüência desejada. Na recepção, o processo inverso deve ser aplicado. Mais detalhes sobre a implementação de um sistema OFDM pode ser obtido em [7].

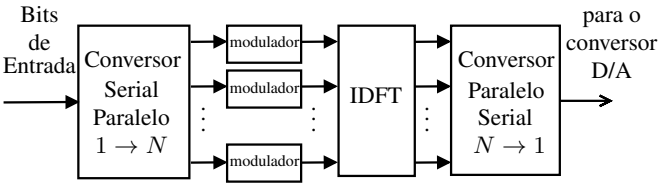


Fig. 2. Transmissor OFDM

Em [6], um sistema OFDM com espalhamento espectral por saltos em freqüência é apresentado. A idéia básica do sistema proposto naquele trabalho é a de se utilizar um OFDM com um número de portadoras K vezes maior do que o necessário, onde K é o fator de espalhamento. Dentro de um símbolo OFDM, das KN portadoras existentes, apenas N são utilizadas. No símbolo OFDM seguinte, através da utilização de uma seqüência pseudo-aleatória, um novo conjunto de N portadoras é escolhido. Mais detalhes sobre este sistema pode ser obtido em [6].

Na literatura de sistemas de comunicação, quando um transmissor utiliza a técnica OFDM em conjunto com códigos corretores de erro, o sistema é normalmente chamado de COFDM. Em geral, os sistemas implementados na prática quase sempre fazem uso de códigos corretores de erro, sendo

que os códigos utilizados são muito variados. É possível encontrar sistemas COFDM operando com códigos turbo [8], sistemas operando com códigos LDPC [9], entre outras possibilidades. Neste trabalho, para avaliar o desempenho frente ao efeito do *jamming*, foi escolhido o sistema COFDM utilizado no padrão de TV digital portátil DVB-H [3]. A Fig. 3 ilustra o fluxo simplificado de dados no padrão DVB-H e foi adaptada da Figura F.1 de [3]. Nesta Figura, os dados a serem transmitidos são aplicados na entrada de um codificador que mapeia 108 bytes em 204 bytes e que é capaz de corrigir até oito erros. Este codificador é derivado do código de Reed-Solomon (255,239). A saída do codificador de Reed-Solomon é aplicada na entrada de um entrelaçador externo de bytes. A saída do entrelaçador é aplicada em um código convolucional cuja taxa pode ser ajustada. As opções de taxa existentes são 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 e 7/8. Todas as taxas são obtidas a partir de códigos derivados de um código convolucional de taxa 1/2. A saída do código é aplicada em um entrelaçador interno de bits cuja saída é enviada para o sistema OFDM. Este sistema pode operar com as modulações QPSK, QAM-16 ou QAM-64 e com 1.705, 3.409 ou 6.817 portadoras.

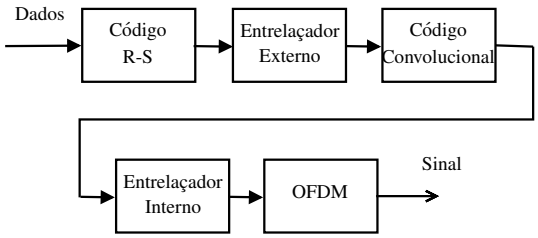


Fig. 3. Fluxo de dados do DVB-H

Dentro do sistema de transmissão ilustrado na Fig. 3, a escolha da taxa do código convolucional, da modulação e do número de portadoras depende da qualidade do canal de comunicação. Canais muito ruidosos, em geral vão exigir uma taxa de código menor e uma modulação com menos pontos na constelação. Canais menos ruidosos permitem a utilização de códigos com taxas maiores e modulações com mais pontos, o que aumenta a taxa de transmissão. Dependendo da seletividade em freqüência do canal, um número maior de portadoras pode melhorar o desempenho ao custo de uma maior complexidade. Mais informações sobre o padrão podem ser obtidas em [3].

IV. Implementação e Resultados Obtidos

A avaliação do sistema de comunicação foi feita através de simulação, usando a ferramenta Simulink do *software* MatLab. A Fig. 4 mostra os blocos utilizados para simular o sistema. Os dados a serem transmitidos foram gerados por uma fonte de binária sem memória, com bits equiprováveis. Os códigos corretores de erro e os entrelaçadores utilizados foram os estabelecidos pelo padrão DVB-H. O OFDM foi implementado com a possibilidade de se utilizar um espalhamento espectral por saltos em freqüência com um fator de espalhamento variável. O canal AWGN com os três tipos diferentes de *jamming* também foi implementado. Através do sistema simulado, foi possível calcular a taxa de erro de bits (BER - *Bit Error Rate*) após o demodulador OFDM, após o código convolucional e após o código de Reed-Solomon, que é a taxa de interesse.

No documento de referência do padrão DVB [3], é apresentado o conceito de *Quasi Error Free* que estabelece uma taxa de erro de 10^{-11} após o código de Reed-Solomon. Considerando a velocidade de transmissão do padrão, esta taxa de erros implica em menos de um erro por hora. Ainda no documento de referência, também é afirmado que para se obter esta taxa após o código de Reed-Solomon, a taxa de erro após o código convolucional deve ser em torno de 2×10^{-4}. Portanto, neste artigo, esta última taxa de erro é tomada como o valor de referência. Para avaliar o efeito do *jamming*, a seguinte estratégia foi adotada. Para cada uma das modulações (QPSK, QAM-16 e QAM-64), o sistema foi projetado para operar em um canal AWGN com a taxa de erro desejada. Para atingir este objetivo, a razão sinal ruído foi ajustada com uma margem de 5 dB sobre o valor necessário para se atingir a taxa de erro desejada, quando o código convolucional utilizado tem taxa de 7/8. O *jamming* foi adicionado ao sistema projetado e sua potência foi sendo aumentada até o nível em que o sistema para de operar com a taxa de erro de 2×10^{-4} após o código convolucional. Esta potência do sinal interferente é o menor valor de potência para o qual o sistema deixa de funcionar conforme o desejado.

Para encontrar os valores de razão sinal ruído de referência, foram realizadas simulações sem o espalhamento espectral e com o código convolucional com taxa 7/8. A partir dos resultados obtidos, a razão sinal ruído foi ajustada para 12 dB no caso do QPSK, para 16 dB no caso do QAM-16 e para 20 dB no caso do QAM-64. O efeito dos três tipos diferentes de interferência foi avaliado para sistemas operando com as três diferentes modulações, com 1.705, 3.409 e 6.817 portadoras e com todas as possíveis taxas do código convolucional. No entanto, devido a similaridade dos resultados, esta Seção apresenta os dados obtidos nas simulações com a modulação QAM-16, com 1.705 portadoras e com o código convolucional operando com a maior e a menor taxa. Para os casos que utilizam o FHSS-COFDM, o fator de espalhamento utilizado nos testes é de 8.

A. Jamming Tonal

Conforme apresentado na Seção 2, o *jamming* tonal é uma senóide e portanto afeta apenas uma freqüência específica do sinal. Como o OFDM possui múltiplas portadoras, um ruído tonal mesmo com alta potência, acaba comprometendo a transmissão de apenas uma portadora. Se não houvesse código corretor de erro, este tipo de ruído (com alta potência) iria provocar uma taxa de erro de símbolo da ordem do inverso do número de portadoras. Pois se a potência do ruído é alta, os símbolos da portadora afetada estarão comprometidos e os símbolos das outras portadoras serão recebidos corretamente. De fato, este fenômeno pode ser observado na simulação, observando a taxa de erro antes do código convolucional.

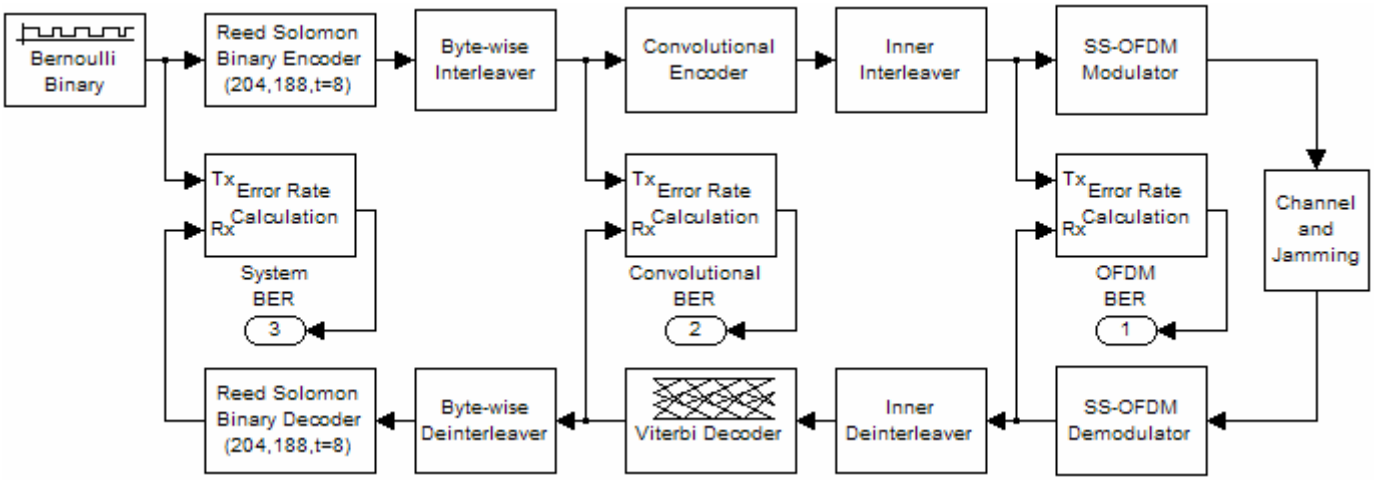


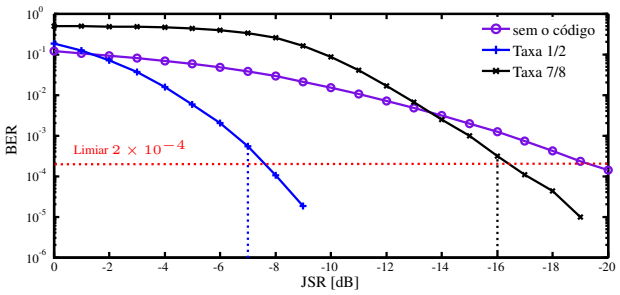
Fig. 4. Sistema implementado com a ferramenta simulink

No entanto, após o código de Reed-Solomon, os erros são corrigidos. Portanto, este tipo de *jamming* é ineficiente e não compromete a qualidade do sistema.

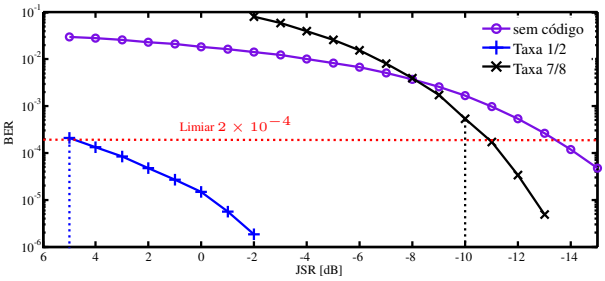
B. Jamming com Banda Limitada

Para a interferência com banda limitada, inicialmente foi simulada a situação sem espalhamento espectral e com um ruído que ocupa metade da faixa do sinal modulado. Na Fig. 5(a), são apresentas as curvas para o código convolucional de taxa 1/2 e o código convolucional de taxa 7/8. Nesta Figura, as taxas de erro são obtidas para diferentes valores de razão *jamming* sinal (JSR — *Jamming Signal Ratio*). A curva da taxa de erro antes do código convolucional é inserida na Figura apenas como referência. É possível observar na Figura que um sinal interferente com uma potência 7 dB abaixo do sinal modulado já compromete o desempenho do sistema, quando o código convolucional opera com taxa 1/2. Já para a taxa de 7/8, basta que o *jamming* esteja 16 dB abaixo do sinal.

A Fig. 5(b) ilustra os resultados obtidos para o FHSS-COFDM. Nesta Figura, é possível observar que a potência mínima necessária para comprometer o funcionamento do sistema é de 5 dB acima do sinal, no caso do código de taxa 1/2 e de 10 dB abaixo do sinal para o código de taxa 7/8. Isto representa um ganho de 12 dB para o sistema com o código convolucional de taxa 1/2 e de 6 dB para o sistema que utiliza taxa 7/8.



(a) COFDM



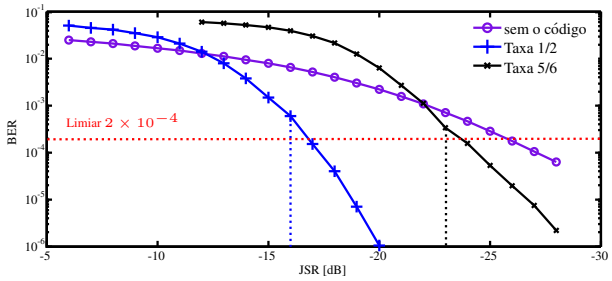
(b) FHSS-COFDM

Fig. 5. Resultados do *jamming* com banda limitada

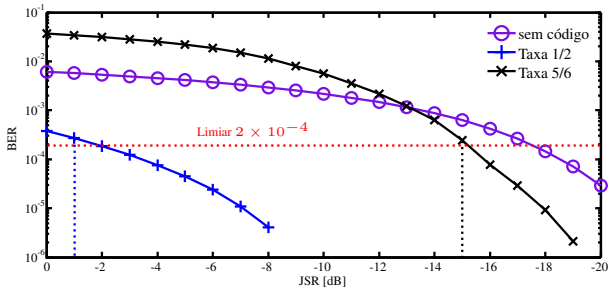
C. Jamming Pulsado

No caso do *jamming* pulsado, a simulação realizada utilizou uma interferência com período de 50 quadros OFDM (o que representa $11,2$ milisegundos), sendo que em 10% do tempo, a interferência está ativa. Analogamente ao que foi feito para o *jamming* com banda limitada, em um primeiro momento, a simulação foi realizada sem o espalhamento espectral. Os resultados mostraram que o sistema com o QAM-16 e com o código convolucional de taxa 1/2 começa a ser afetado quando o *jamming* está 16 dB abaixo do sinal. Para este tipo de *jamming*, os resultados do código convolucional de taxa 7/8 são equivalentes aos resultados sem código e portanto são de pouco interesse (neste caso, o código de taxa 7/8 só apresenta vantagens para uma faixa de probabilidade de erro abaixo de 2×10^{-4}). Já para o código de taxa 5/6, os resultados mostraram que uma interferência 23 dB abaixo do sinal já impede que o desempenho desejado seja obtido. Estes resultados estão ilustrados na Fig. 6(a), onde também é inserida a curva de erro obtida antes do decodificador convolucional.

No caso do FHSS-COFDM, o sistema que opera com código convolucional de taxa 5/6 é afetado quando o *jamming* está 15 dB abaixo do sinal. Este valor representa um ganho de 8 dB em relação ao sistema sem espalhamento espectral.



(a) COFDM



(b) FHSS-COFDM

Fig. 6. Resultados do *jamming* pulsado

No caso do código operar com taxa 1/2, foi observado que um ruído 1 dB abaixo do sinal é capaz de comprometer a transmissão de dados. Isto representa um ganho de 15 dB. Os resultados do FHSS-COFDM são apresentados na Fig. 6(b).

D. Resumo dos Resultados Obtidos

A Tabela I apresenta de forma resumida os resultados apresentados neste trabalho. A primeira coluna indica o sistema utilizado, COFDM ou FHSS-COFDM com espalhamento espectral de 8 vezes. Na segunda coluna, o tipo de *jamming* utilizado é indicado. A taxa do código convolucional é apresentada na terceira coluna. O resultado mais importante é apresentada na coluna 4, que é a JSR mínima que faz com que o sistema deixe de operar com a taxa de erro desejada.

TABELA I — RESULTADOS OBTIDOS

Sistema	*Jamming*	Taxa	JSR (dB)
COFDM	tonal	todas	> 6
	banda limitada	1/2	-7
		7/8	-16
	pulsado	1/2	-16
		5/6	-23
FHSS-COFDM 8×	tonal	todas	> 6
	banda limitada	1/2	5
		7/8	-10
	pulsado	1/2	-1
		5/6	-15

Ainda com relação à simulação, é interessante ressaltar que devido ao volume de dados simulado, quando a taxa de erro após o código convolucional está na faixa de interesse, a taxa de erro após o código de Reed-Solomon é zero. Na verdade, para se medir a taxa de erro de 10^{-11}, seria necessário um volume de dados muito maior na simulação o que é praticamente inviável.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a avaliação de sistemas de comunicação que utilizam a técnica COFDM quando o sinal modulado é transmitido através de um canal AWGN com *jamming*. O sistema de comunicação utilizado foi baseado no sistema proposto no padrão DVB-H e conta com dois códigos corretores de erro concatenados (um código convolucional seguido de um de Reed-Solomon). Inicialmente o sistema foi projetado para operar com taxa de erro de bit de 2×10^{-4} após o código convolucional (o que representa 10^{-11} após o código de Reed-Solomon). A potência de transmissão foi ajustada com uma margem de 5 dB acima da necessária. Após este projeto inicial, foi inserido o sinal interferente que podia ser de três tipos distintos: tonal, com banda limitada e pulsada. Foram medidas as potências dos sinais interferentes que faziam com que a taxa de erro superasse a desejada. Seguindo esta linha, foi observado que a interferência tonal não consegue atrapalhar a transmissão. Entre a interferência com banda limitada e a pulsada, a última foi a que apresentou o maior prejuízo para o sistema. Para o COFDM com 1.705 portadoras, modulação QAM-16 e código convolucional com taxa 5/6, um *jamming* pulsado com potência de -23 dB abaixo do sinal modulado já é o suficiente para perturbar a transmissão. Para reduzir este efeito, este artigo propôs a utilização da técnica de espalhamento espectral por saltos em freqüência adaptada ao COFDM. As melhorias apresentadas são significativas. Por exemplo, para o caso em que o COFDM opera com 1.705 portadoras, modulação QAM-16 e código convolucional com taxa 5/6, um espalhamento espectral de oito vezes produz um ganho de 8 dB.

REFERÊNCIAS

[1] Departmanet of Defense Dictionary of Military and Associated Terms, disponível em "http://www.dtic.mil/doctrine/new_pubs/jp1_02.pdf", último acesso em 5 de abril de 2011.

[2] H. Zhonghua & L. Yinlin, "Model Research of the Military Electronic Information System (C4ISR)," Proc. of International Conference opn Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 2010.

[3] ETSI EN 300 744, "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", v.1.5.1, Digital Boradcasting Experts Group, 2004.

[4] ARIB STD-B31, "Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting", Version 1.6, 2005.

[5] M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz & B. K. Levitt, *Spread spectrum communications handbook*, McGraw-Hill, Eletronic Edition, 2002.

[6] P. Tu, X. Huang & E. Dutkiewicz, "A novel approach of spreading spectrum in ofdm systems," Proc. of International Symposium on Communications and Inforrmation Technologies, 2006.

[7] J. G. Proakis & M. Salehi, *Digital Communications*, 5^{th} Ed., McGraw-Hill, 2007.

[8] L. Sylla, P. Fortier & H. T. Huynh, "Performance of cofdm using turbo codes," *Proc. of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1999.

[9] H. Futaki, T. Ohtsuki, "Low-density parity check (ldpc) coded ofdm systems," *Proc. of Vehicular Technology Conference*, 2001.