

# Otimização de Limiars Para Adaptação de Modulação Diante de Erros no Canal de Retorno

Juraci Ferreira Galdino e Edmar Candeia Gurjão

**Resumo**—Este trabalho aborda o tema de modulação adaptativa para canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento plano. Nessas estratégias de modulação, o receptor classifica o estado do canal de acordo com um conjunto de limiars, e envia essa informação por meio do canal de retorno para o transmissor que altera a modulação com base nessa informação. Atenção especial é dedicada ao problema de otimização dos limiars de adaptação diante da presença de erros no canal de retorno. Mostra-se que esses erros provocam o surgimento de uma região de inviabilidade, na qual o sistema de modulação adaptativa não consegue atender aos requisitos de probabilidade de erro máxima no enlace. Os resultados apresentados indicam que essa região se amplia com o aumento do espalhamento Doppler do canal de retorno e do espaçamento entre símbolos que são empregados para rastrear a dinâmica desse canal. Em razão da importância desses erros no desempenho do sistema de modulação adaptativa, propôs-se, neste trabalho, considerar esses distúrbios na função custo empregada na otimização dos limiars. A partir dessa nova formulação do problema de otimização foram obtidos limiars que possibilitaram a redução da região de inviabilidade.

**Palavras-Chave**—Modulação adaptativa, desvanecimento plano, erro de estimação de canal.

**Abstract**—In this paper we address adaptive modulation over flat fading channels. We give special attention to the choice of the adaptation thresholds in the receiver, typically employed in this transmission schemes. In this choice, we take into account transmission and estimation errors in the feedback channel. In this scenario, we show the presence of an outage region in which the adaptive modulation system cannot attain the required maximum bit error probability. Numerical results here presented show that increasing the Doppler spread and the distance between the pilots symbols used to track the feedback channel yields an increasing in the outage region. We also shown the importance of take into account these effects in the threshold optimization in order to reduce the outage region.

**Keywords**—Adaptive modulation, flat fading, channel estimation errors.

## I. INTRODUÇÃO

As técnicas de modulação adaptativa variam o tipo de modulação de acordo com as condições de propagação do canal, com base em informações enviadas pelo receptor através do canal de retorno, no sentido de maximizar a eficiência espectral (EE) atendendo a um requisito de máxima probabilidade de erro. Assim sendo, quando os canais oferecem boas condições de propagação normalmente é adotado um esquema de modulação com muitos pontos na constelação, ao passo que

quando o canal excursiona por profundos desvanecimentos são adotadas modulações com pequena cardinalidade.

Diversos trabalhos vêm sendo publicados nessa área de pesquisa, no entanto, algumas questões importantes ainda continuam sem solução peremptória. No que se refere ao canal de retorno, por exemplo, uma questão que vem sendo amplamente discutida na literatura diz respeito à avaliação da degradação de desempenho das técnicas de modulação adaptativa em presença de atraso no canal de retorno [1], bem como a proposição de estratégias de previsão para amenizar essa degradação de desempenho [2].

Muitos trabalhos desprezam os erros de transmissão do canal de retorno [3], [4]. Respaldam tal suposição com a assertiva de que tais erros podem ser reduzidos a um nível desejado com a adoção de códigos corretores de erro. Outros trabalhos, no entanto, apontam que tais erros devem ser considerados, não apenas na avaliação de desempenho, mas também na otimização dos parâmetros da técnica de modulação adaptativa [2], [5]. Os pesquisadores que defendem esse ponto de vista argumentam que a adoção de poderosas estratégias de correção de erro introduz atrasos, em razão do uso de *interleavers*, um sério inconveniente às técnicas de modulação adaptativa, e ocupam em demasia o canal de retorno com sinais de controle, reduzindo, por conseguinte, a EE de todo sistema de comunicação.

Em [2], empregando um canal BSC, do termo em inglês *Binary Symmetric Channel*, para modelar o canal de retorno, foi mostrado que o desempenho do sistema de modulação adaptativa é sensivelmente degradado diante da presença de tais erros, fazendo surgir inclusive uma faixa de razão sinal ruído média no enlace avante na qual não se atende aos requisitos de probabilidade de erro máxima. Essa faixa de valores forma o que é aqui denominada de região inviável.

Neste trabalho, seguindo uma abordagem similar a adotada em [2], avalia-se o desempenho do sistema de modulação adaptativa diante dos erros de transmissão no canal de retorno. Porém, aqui são apresentadas algumas contribuições em relação àquele trabalho.

Em primeiro lugar, aqui são apresentadas curvas de probabilidade de erro e de eficiência espectral, ao passo que em [2] são apresentadas apenas curvas de EE. O canal de retorno é modelado da mesma maneira que o canal avante, ou seja, por desvanecimento plano, cuja dinâmica temporal é modelada por um processo estacionário em sentido amplo com espectro de Jakes. Em [2] emprega-se o modelo BSC para o canal de retorno. Terceiro, avalia-se o impacto do erro de estimação do canal de retorno no desempenho de sistemas de modulação adaptativa, e, por fim, propõe-se incluir na função

custo empregada na otimização dos limiares de adaptação os erros de estimação do canal de retorno.

O restante deste trabalho é organizado da seguinte maneira. O sistema de comunicação investigado neste trabalho é apresentado na Seção II. A avaliação de desempenho desse sistema é realizada na Seção III. A Seção IV é voltada para a discussão dos resultados numéricos e, por fim, na Seção V são apresentadas as conclusões do trabalho.

## II. MODULAÇÃO ADAPTATIVA

Nos cenários em que o canal de comunicação é variante no tempo, os sistemas de comunicação que empregam técnicas de modulação fixa, fazem uso inadequado de valiosos recursos do sistema de transmissão como, por exemplo, a largura de banda, uma vez que os parâmetros do sistema de transmissão são dimensionados com base nas condições de propagação severas do canal.

Nas técnicas de modulação adaptativa, em contraposição às técnicas de modulação fixa, a constelação da modulação varia ao longo da transmissão de acordo com as condições do canal. Quando o canal apresenta excelentes condições de propagação, é possível atingir baixas taxas de erro usando modulações com elevadas eficiências espectrais. Por outro lado, quando o canal apresenta severas condições de propagação, a manutenção da taxa de erro de bit (BER - do termo em inglês *Bit Error Rate*) em valores moderados requer o uso de modulações com reduzidas eficiências espectrais.

Admitindo que o sistema de comunicação deve atender a um requisito de probabilidade de erro de bit máxima ( $PE_{MAX}$ ), a modulação adaptativa, com base na razão sinal ruído (SNR do termo em inglês *Signal to Noise Ratio*) instantânea, escolhe a técnica de maior EE que garante uma taxa de erro menor ou igual à  $PE_{MAX}$ .

O diagrama de blocos em banda base do sistema de comunicação digital sob investigação é ilustrado na Figura 1.

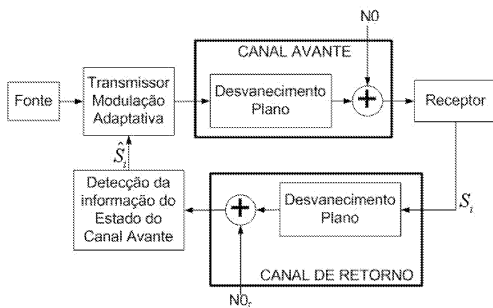


Fig. 1. Diagrama básico de um enlace de comunicação que emprega técnica de modulação adaptativa.

Neste trabalho os canais avante e de retorno são estaticamente independentes e modelados pelo efeito de desvanecimento plano e variante no tempo.

Assume-se que a fonte de informação gera bits estatisticamente independentes e equiprováveis, os quais são entregues ao modulador digital, localizado no bloco intitulado Transmissor Modulação Adaptativa, para fins de mapeamento em símbolos  $s_k$ , de energia média  $E_s$ , dentre os disponíveis no alfabeto da técnica de modulação. Em geral, nos sistemas com

modulação adaptativa são empregadas constelações QAM, do termo em inglês *Quadrature Amplitude Modulation*, em razão do bom compromisso entre eficiência espectral e probabilidade de erro de bit que essas modulações oferecem [6].

A observação em banda base na entrada do receptor é dada por

$$y_k = h_k s_k + \eta_k \quad (1)$$

sendo  $h_k$  o coeficiente do canal que é modelado por um processo estacionário em sentido amplo, cuja densidade espectral de potência (DEP) é dada pelo espectro de Jakes [12], com máximo desvio Doppler normalizado denotado por  $f_D T$ , sendo  $T$  a duração do símbolo;  $\eta_k$  é o ruído aditivo modelado por um processo gaussiano branco complexo de média nula, cujas componentes real e imaginária são independentes e de mesma variância,  $\frac{N_0}{2}$ ; e  $k$  representa o índice do instante de tempo considerado.

O sinal recebido é empregado para detectar a informação transmitida, e para estimar a SNR instantânea. Essa estimativa é então comparada com os limiares de adaptação para fins de escolha da modulação que mais se adequa as atuais condições de propagação do canal avante. Essa informação é então codificada em uma seqüência binária e enviada para o transmissor, através do canal de retorno usando uma modulação fixa. Lá essa informação é adotada para escolher a modulação a ser empregada na transmissão do próximo bloco de dados.

O sinal recebido na entrada do transmissor, através do canal de retorno, é dado por

$$y_{k'}^r = h_{k'}^r u_{k'} + \eta_{k'}^r \quad (2)$$

sendo  $h_{k'}^r$  o coeficiente do canal de retorno que é modelado por um processo estacionário em sentido amplo, cuja DEP é dada pelo espectro de Jakes [12], com máximo desvio Doppler normalizado denotado por  $f_D^r T^r$ , sendo  $T^r$  a duração do símbolo;  $u_{k'}$  é o símbolo transmitido. Neste trabalho, a exemplo do que foi adotado em [2], emprega-se a modulação BPSK no canal de retorno. Assim sendo,  $u_{k'} \in \{-\sqrt{E_b}, \sqrt{E_b}\}$ ;  $\eta_{k'}^r$  é o ruído aditivo modelado por um processo gaussiano branco complexo de média nula, com componentes real e imaginária independentes e de mesma variância,  $\frac{N_0^r}{2}$ ; e  $k'$  representa o índice do instante de tempo considerado.

Para essa modelagem estatística, técnica de modulação e canal conhecido, a probabilidade de erro de bit do canal de retorno é dada por [6]

$$P_b^r(e|h^r) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_r}{1 + \bar{\gamma}_r}} \right), \quad (3)$$

em que  $\bar{\gamma}_r$  representa a SNR média no canal de retorno ( $SNR_R$ ), que é dada por  $\bar{\gamma}_r = \frac{E_b \sigma_{h^r}^2}{N_0^r}$ , sendo  $\sigma_{h^r}^2$  o perfil de potência do canal de retorno; ou por  $\bar{\gamma}_r = \frac{E_b^r}{N_0^r}$  para canal normalizado.

Na modulação adaptativa sob investigação são empregadas  $N$  estratégias de transmissão, denotadas por  $M_i$ , sendo  $i = 1, \dots, N$ , em que  $M_1$  representa a estratégia de não transmissão, e as demais transmitem com modulações que possuem  $M_i = 2^{k_i}$  pontos na constelação, assim sendo,  $k_i$

denota o número de bits mapeados em um único símbolo da constelação.

O conjunto  $\mathcal{S}_i$  representa a faixa de SNR instantânea, doravante denotada por  $\gamma$ , na qual se adota o esquema de transmissão  $M_i$ . Considerando que essa estratégia de transmissão é escolhida quando  $\lambda_{i-1} \leq \gamma < \lambda_i$ , então  $\mathcal{S}_i = \{\gamma \in \mathbb{R} \mid \lambda_{i-1} \leq \gamma < \lambda_i\}$ . Nessa notação  $\lambda_0 = 0$  e  $\lambda_N \rightarrow \infty$ . Os parâmetros  $\lambda_i$  são aqui denominados de limiares de adaptação.

Nesse sistema de modulação adaptativa, para cada bloco de dados enviado no canal avante são remetidos  $L = \lceil \log_2(N) \rceil$  símbolos BPSK para informar ao transmissor o tipo de modulação que deve ser adotada no próximo bloco de dados.

Assumindo que  $\mathbf{u}_j \in \mathbb{Z}^L$  denota a seqüência binária referente ao estado  $\mathcal{S}_j$ , que o canal de retorno é conhecido e que  $f_D^T T^r L \ll 1$ , pode-se considerar o modelo de canal quase estático durante a transmissão dos  $L$  símbolos BPSK. Assim sendo, a probabilidade de se empregar a estratégia de modulação  $M_i$ , dado que o receptor indica a  $M_j$  como a mais apropriada,  $q_{ij}$ , pode ser expressa da seguinte maneira

$$q_{ij} = Pr(\mathbf{u}_i \mid \mathbf{u}_j) = q^{d_{ij}}(1 - q)^{L - d_{ij}}, \quad (4)$$

em que  $d_{ij}$  denota a distância de Hamming entre os vetores  $\mathbf{u}_i$  e  $\mathbf{u}_j$  e  $q$  a probabilidade de erro de bit do canal de retorno, que pode ser dada por  $P_b^r(e|h^r)$ .

Na prática, o canal de retorno deve ser estimado. Assim sendo, é importante considerar os erros de estimação desse canal na avaliação de desempenho da estratégia de modulação adaptativa.

Admitindo que o transmissor dispõe de uma estimativa despolarizada do canal de retorno,  $\hat{h}_{k'}^r$ , dada por,

$$\hat{h}_{k'}^r = h_{k'}^r + e_{k'}, \quad (5)$$

em que  $e_{k'}$  segue uma distribuição gaussiana complexa de média nula e variância  $\Delta$ .

Substituindo a Eq. 5 na Eq.2, chega-se a

$$y_{k'}^r = \hat{h}_{k'}^r u_{k'} + \tilde{\eta}_{k'}^r, \quad (6)$$

em que  $\tilde{\eta}_{k'}^r$  é dado por

$$\tilde{\eta}_{k'}^r = \eta_{k'}^r + e_{k'} u_{k'}. \quad (7)$$

Assim sendo, a variável de decisão no receptor,  $z_{k'}$  fica dada por

$$z_{k'} = u_{k'} + w_{k'}. \quad (8)$$

Na qual

$$w_{k'} = \frac{\tilde{\eta}_{k'}^r}{\hat{h}_{k'}^r}. \quad (9)$$

Admitindo que  $u_{k'}$  é estatisticamente independente de  $e_{k'}$ , uma suposição razoável na condição de regime permanente, e que  $u_{k'}$  é estatisticamente independente de  $\eta_{k'}^r$ ,  $w_{k'}$ , quando condicionado a  $\hat{h}^r$ , pode ser modelado por um processo estocástico gaussiano de média nula e variância dada por

$$\sigma_{w|\hat{h}}^2 = \frac{1}{E_b^r |\hat{h}|^2} [N_0^r + E_b^{r2} \Delta]. \quad (10)$$

Supondo que  $\hat{h}_{k'}^r$  possui a mesma modelagem estatística de  $h_{k'}^r$ , ou seja, módulo com distribuição de Rayleigh e fase com distribuição uniforme entre 0 e  $2\pi$ , a probabilidade de erro do canal de retorno fica dada por

$$P_e(e|\Delta) = \int_0^\infty Q\left(E_b^r |r| \sqrt{\frac{2}{N_0^r + E_b^{r2} \Delta}}\right) \frac{r}{\sigma_{h^r}^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_{h^r}^2}} dr \quad (11)$$

Para  $Q(x) \leq 10^{-1}$ , uma boa aproximação da função  $Q(\cdot)$  é dada por

$$Q(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}x} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (12)$$

Substituindo-se a Eq. 12 na Eq. 11, pode-se mostrar que

$$P(e|\Delta) = \frac{\sqrt{2}}{4E_b^r \sigma_{h^r}} \frac{(N_0^r + E_b^{r2} \Delta)}{\sqrt{N_0^r + E_b^{r2} (\Delta + 2\sigma_{h^r}^2)}}. \quad (13)$$

Considerando a modelagem estocástica e suposições de independência estatística comumente adotadas na análise de sistemas de comunicação sem fio, em [10] foi obtida a expressão do Erro Quadrático Médio (EQM), em regime estacionário, do algoritmo LMS (*Least Mean Square*) quando empregado na identificação de canais de comunicações (Eq. 18 daquele trabalho). O referido EQM é obtido em função do passo do LMS, e escrita em termos de parâmetros típicos do sistema de transmissão e do modelo do canal de comunicação.

Considerando que  $\Delta$  é igual ao EQM mínimo do LMS para um espectro de Jakes, foram obtidas curvas analíticas de probabilidade de erro de bit, a partir da Eq. 13, e empíricas (BER, *Bit Error Rate*) obtidas via simulação de Monte Carlo (Fig. 2). Essas curvas foram geradas para várias condições de SNR, expressa em termos de  $E_b^r/N_0^r$ , espalhamento Doppler e espaçamento entre símbolos pilotos (TB). Vê-se um excelente ajuste entre resultados empíricos e analíticos, validando a aproximação adotada nas deduções.

É importante verificar nesta figura que os erros de estimação degradam sobremodo a probabilidade de erro de bit, especialmente para elevados valores de espalhamento Doppler e de TB.

### III. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E OBTENÇÃO DOS LIMIARES DE ADAPTAÇÃO

A otimização dos valores dos limiares de adaptação é crucial para que a técnica de modulação adaptativa atinja um bom desempenho. Essa otimização é objeto de investigação deste trabalho.

A probabilidade do transmissor utilizar a estratégia de transmissão  $M_i$  pode ser expressa por

$$\pi'_i = \sum_{j=1}^N \pi_j q_{ij} \quad (14)$$

em que  $\pi_j$  denota a probabilidade do receptor indicar o esquema de modulação  $M_j$  como o mais apropriado, que é dada pela probabilidade de que  $\lambda_{j-1} \leq \gamma < \lambda_j$ . Ou seja,

$$\pi_j = \int_{\mathcal{S}_j} f_{\overline{\gamma}}(\gamma) d\gamma, \quad (15)$$

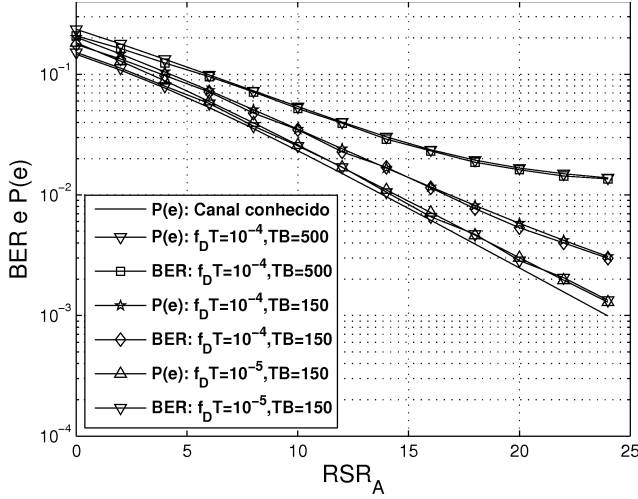


Fig. 2. Probabilidade e taxa de erro de bit para a modulação BPSK diante de erros de estimação de canal.

na qual  $f_{\bar{\gamma}}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}}$  em que  $\bar{\gamma} = E_b/N_0$ , ou seja a SNR média do canal avante.

A partir da Eq. 14 pode-se expressar a EE da estratégia de transmissão adaptativa por

$$EE = \sum_{i=2}^N k_i \pi'_i. \quad (16)$$

Seguindo a abordagem proposta em [2], a probabilidade de erro de bit,  $P(e)$ , do sistema de modulação adaptativa, levando-se em conta os erros do canal de retorno, pode ser expressa da seguinte maneira

$$P(e) = \frac{1}{EE} \left\{ \sum_{i=2}^N k_i \sum_{j=1}^N q_{ij} PE_{ij} \right\} \quad (17)$$

sendo  $PE_{ij}$  a probabilidade de erro obtida no canal avante para o esquema de modulação  $i$ , quando o receptor indica que o esquema de modulação  $j$  é o mais recomendado.

Assim sendo,  $PE_{ij}$  pode ser dada por

$$PE_{ij} = \int_{S_j} P_b(e | \gamma, M_i) f_{\bar{\gamma}}(\gamma) d\gamma, \quad (18)$$

sendo que  $P_b(e | \gamma, M_i)$  denota a probabilidade de erro de bit das técnicas de modulação adotadas em canal AWGN. Para  $M_i = 2$ , essa probabilidade é dada por

$$P_b(e | \gamma, M_i) = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}). \quad (19)$$

Para modulações QAM- $M_i$ , essas probabilidades podem ser dadas por [7]:

$$P_b(e | \gamma, M_i) = \frac{1}{\log_2 \sqrt{M_i}} \sum_{m=1}^{\log_2 \sqrt{M_i}} P_b(m) \quad (20)$$

sendo

$$P_b(m) = \frac{1}{\sqrt{M_i}} \sum_{n=0}^{(1-2^{-m})\sqrt{M_i}-1} \left\{ (-1)^{\lfloor \frac{n \cdot 2^{m-1}}{\sqrt{M_i}} \rfloor} \right. \\ \times \left( 2^{m-1} - \left\lfloor \frac{n \cdot 2^{m-1}}{\sqrt{M_i}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) \\ \times \left. \text{erfc} \left( (2n+1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M_i \gamma}{2(M_i-1)}} \right) \right\}. \quad (21)$$

Os limiares de adaptação são obtidos resolvendo um problema de otimização com restrição, em que se procura maximizar a eficiência espectral, Eq. 16, sujeito a restrição de que  $P(e) \leq PE_{MAX}$ . A  $PE_{MAX}$  depende da aplicação e representa um importante requisito de Qualidade de Serviço (QoS) da camada física. O seu valor deve ser rigorosamente atendido, sob pena de prejudicar o funcionamento dos protocolos de camada superior empregados no sistema de transmissão.

Para  $q_{ij} = \delta(i-j)$ , esse problema de otimização se reduz ao caso amplamente tratado na literatura em que os erros do canal de retorno são ignorados na obtenção dos limiares [3], [4], [13], [14]. Admitindo-se que  $q_{ij}$  é calculado (Eq. 4) considerando que  $q$  é a probabilidade de erro de um canal BSC, o problema de otimização se reduz a aquele proposto em [2]. Se  $q_{ij}$  for obtido para  $q$  dado pela Eq. 3, considera-se, no referido problema de otimização, os erros de transmissão no enlace de retorno, admitindo-se que o canal de retorno é conhecido. Por fim, considerando-se a equação aqui proposta, Eq. 13, no cálculo de  $q_{ij}$  (Eq. 4), são levados em conta também os erros de estimação do canal de retorno.

#### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados resultados numéricos para um sistema de modulação adaptativa que emprega  $N = 4$  estratégias de transmissão. Além da possibilidade de não transmitir dados, nele são adotadas as modulações QAM-16, QAM-64 e QAM-256. Tais resultados foram obtidos considerando  $PE_{MAX} = 10^{-2}$  e  $f_D T = f_D^r T^r$ , sob condição de variação da SNR média do canal avante ( $SNR_A$ ), e SNR média do canal de retorno ( $SNR_R$ ).

Considerando limiares de adaptação obtidos sob a hipótese de que  $q_{ij} = \delta(i-j)$ , avaliou-se o desempenho do sistema de modulação adaptativa diante de um canal de retorno com erro. Inicialmente, para o caso em que se considera que esse canal é conhecido pelo transmissor, os resultados de  $P(e)$  e  $EE$  são apresentados, respectivamente, nas Figs. 3 e 4.

Vê-se na Fig. 3 que à medida que se reduz a  $SNR_R$ , amplia-se a região de inviabilidade, ou seja, a faixa de SNR do canal avante em que não se atende à restrição de probabilidade de erro máxima no sistema de comunicação. Em particular, para  $SNR_R = 10\text{dB}$ , só quando  $SNR_A \geq 15\text{dB}$  é que  $P(e) \leq 10^{-2}$ . Nesses casos, apesar da elevada taxa de erro do canal de retorno, superior a  $2 \times 10^{-2}$ , conforme resultados apresentados na Fig. 2, a probabilidade de escolha das modulações de maior eficiência espectral aumenta, assim sendo, os efeitos do canal de retorno tendem a prejudicar mais a eficiência espectral do que a probabilidade de erro, conforme pode ser visto na Fig. 4.

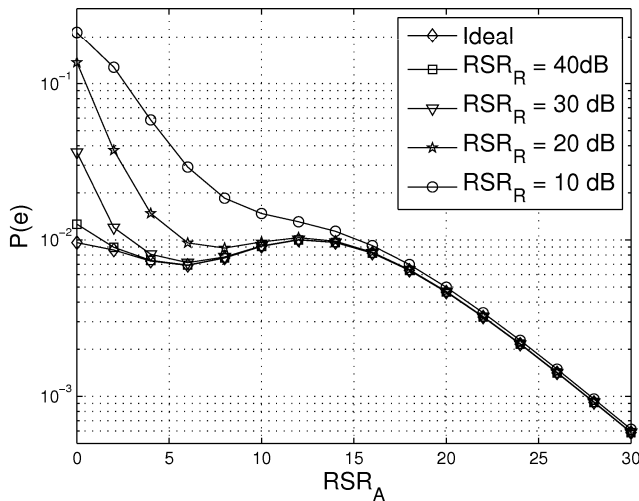


Fig. 3. Probabilidade de erro de bit sob condição de variação de SNR média do canal avanço ( $SNR_A$ ) e SNR do canal de retorno ( $SNR_R$ )

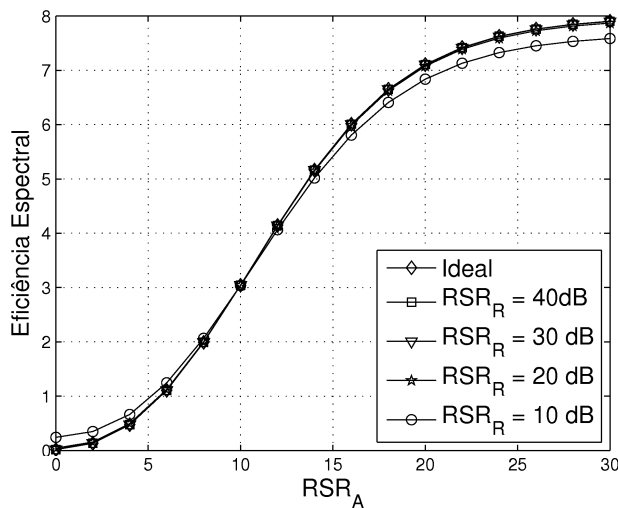


Fig. 4. Eficiência espectral sob condição de variação de SNR média do canal avanço ( $SNR_A$ ) e SNR do canal de retorno ( $SNR_R$ )

É importante verificar que para a  $SNR_R = 20$  dB, que, em situação ideais (conhecimento do ganho do canal de retorno), propicia uma probabilidade de erro em torno de  $3 \times 10^{-3}$ , e, portanto, bem inferior ao que recomenda alguns padrões de comunicação para o desempenho do canal de retorno, como, por exemplo, o WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) [5], só é possível atender aos requisitos de desempenho para  $SNR_A$  maiores do que 6dB. Vale mencionar que esses resultados estão em conformidade com aqueles obtidos em [2], [5], no entanto, os resultados aqui apresentados permitem relacionar a faixa de inviabilidade com a SNR do canal de retorno, aspectos que lá não são apontados.

Na Fig. 5, considerando-se  $SNR_R = 20$  dB, avalia-se a degradação de desempenho do sistema de modulação adaptativa diante de erros de estimação do canal de retorno,

sob condição de variação do espalhamento Doppler desse canal e do espaçamento entre símbolos pilotos ( $TB$ ) para atualização dessas estimativas. Na geração de todas as curvas foi admitido o emprego do algoritmo adaptativo LMS (*Least Mean Square*) na estimativa de  $\hat{h}_{k'}^r$ , e que se atinge a condição de Mínimo Erro Quadrático Médio desse algoritmo [10].

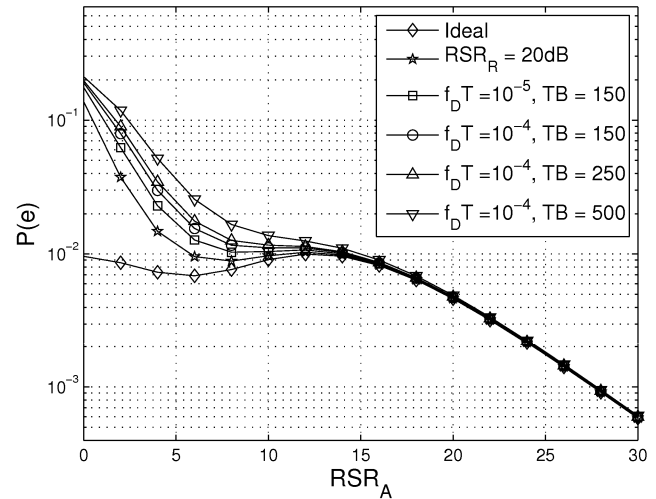


Fig. 5. Desempenho do sistema de modulação adaptativa diante de erros de estimação do canal de retorno, sob condição de variação do espalhamento Doppler desse canal e do espaçamento entre símbolos pilotos ( $TB$ )

Essa figura mostra uma clara degradação de desempenho do sistema de modulação adaptativa diante dos erros de estimação do coeficiente do canal de retorno. Muitos trabalhos avaliam o impacto dos erros de estimação do canal avanço no desempenho de sistemas de modulação adaptativa, por exemplo, [11], outros propõem maneiras de contornar o atraso inerente ao canal de retorno, como, por exemplo [9], [8], porém, até onde concerne o nosso conhecimento, o impacto dos erros de estimação do canal de retorno no desempenho do sistema de modulação adaptativa tem sido negligenciado. Embora seja razoável a percepção da importância desses erros, uma vez que eles degradam o desempenho do processo de recepção da seqüência binária que codifica o tipo de modulação escolhido no receptor, conforme apresentado na Fig. 5.

Mais importante do que a degradação de desempenho na probabilidade de erro, destaca-se o aumento da faixa de região inviável, especialmente com o aumento de  $f_D T$  e  $TB$ . Nos resultados apresentados na Fig. 5, vê-se que para uma  $f_D T = 10^{-4}$  e  $TB = 500$ , a região de inviabilidade se estende até 15 dB de  $SNR_A$ .

Uma forma de tentar amenizar esse inconveniente é considerar os erros de estimação do canal na obtenção dos limiares de adaptação, de acordo com o procedimento proposto neste trabalho. Na Fig. 6 são apresentadas curvas de probabilidade de erro geradas considerando esses limiares.

Em relação aos resultados apresentados na Fig. 5, observa-se uma redução da região de inviabilidade. Para a condição mais severa de espalhamento Doppler e de atualização das estimativas do coeficiente do canal, vê-se que é possível

atender à restrição imposta para o desempenho do sistema de modulação adaptativa com uma  $SNR_A$  superior a 10 dB, portanto, 5 dB a menos do que no caso onde os limiares foram obtidos desprezando os erros de estimação do canal de retorno. Esse ganho vem acompanhado de uma pequena degradação na eficiência espectral do sistema, conforme mostrado na Fig. 7.

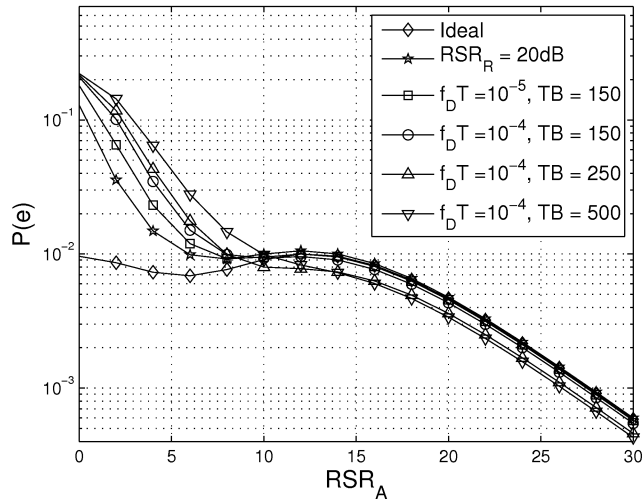


Fig. 6. Desempenho considerando erros de estimação do canal de retorno.

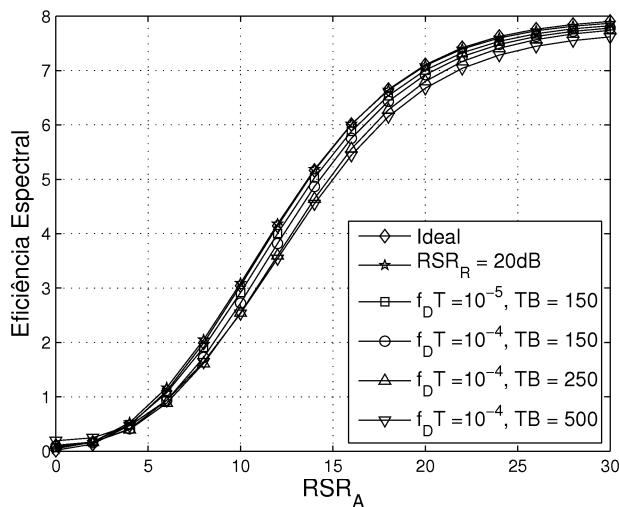


Fig. 7. Eficiência espectral considerando erros de estimação do canal de retorno

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o tema de modulação adaptativa para canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento plano. Atenção especial foi dedicada ao problema de otimização dos limiares de adaptação diante da presença de erros de transmissão no canal de retorno, e de erros de estimação desse canal.

Aqui corroborou-se os resultados apresentados em [2], [5], na medida em que se mostrou o surgimento de uma região inviável diante da presença de erros de transmissão no canal de retorno. Além disso, investigou-se, em maior profundidade, as características de desempenho do sistema de transmissão adaptativa diante de distúrbios induzidos pelo canal de retorno, particularmente no que se refere aos erros de estimação desse canal.

Mostrou-se que esses erros exercem forte influência no desempenho desses sistemas, e, portanto, não devem ser desprezados. Pelo contrário, devem ser considerados e valorizados, não apenas na avaliação de desempenho desses sistemas, mas também na otimização dos limiares de adaptação, bem como no dimensionamento do espaçamento entre símbolos pilotos adotados no canal de retorno.

Outra contribuição deste trabalho foi obter um limitante de desempenho, muito bem ajustado, para a modulação BPSK diante de erro de estimação de um canal caracterizado pelo efeito de desvanecimento plano.

## AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seus agradecimentos ao apoio material e financeiro prestado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - Brasil ao desenvolvimento deste trabalho (Edital MCT/CNPq 15/2007 - Universal).

## REFERÊNCIAS

- [1] D. L. Goeckel *Adaptive Coding Modulation for Time-varying Channels using Outdated Channel Estimation*, IEEE Trans. Comm, Vol. 47, No 6, Jun 1999.
- [2] Antony E. Ekpenyong and Yih-Fang Huang. *Feedback-Detection Strategies for Adaptive Modulation Systems*. IEEE Trans Comm., Vol. 54, No 10, October 2006.
- [3] TORRANCE, J. M. e Hanzo, L. *Optimisation of switching levels for adaptive modulation in slow Rayleigh fading*, IEE Electronics Letters, 32(13):1167 - 1169, June 1996a.
- [4] TORRANCE, J. M. e Hanzo, L. *Upper bound performance of adaptive modulation in a slow Rayleigh fading channel*, Electronics Letters, 32(32):718 - 719, Apr 1996b.
- [5] Antony E. Ekpenyong and Yih-Fang Huang. *Feedback Constraints for Adaptive Transmission*, IEEE Signal Proc. Mag., pp. 69-78, May 2007.
- [6] John G. Proakis. *Digital Communications*, McGraw-Hill, 4a Ed., 2000.
- [7] Kyongkuk Cho; Dongweon Yoon. *On the General BER Expression of One and two dimensional Amplitude Modulation*, IEEE Trans. Comm, Vol. 50, No 7, July 2002.
- [8] Sorour Falahati, Torbjorn Ekman and Mikael Sternard *Adaptive Modulation Systems for Predicted Wireless Channels*. IEEE Trans. on Comm. Vol. 52, No 2, Feb 2004.
- [9] A. Duel-Hallen. *Fading Channel Prediction for Mobile Radio Adaptive Transmission Systems*. Proceedings of the IEEE, vol. 95, Issue 12, dec. 2007.
- [10] Galdino, J.F., Pinto, E. L. e Alencar, M. S., *Analytical Performance of the LMS Algorithm on the Estimation of Wide Sense Stationary Channels*, IEEE Trans. Comm, Vol 52, No 6, 2004.
- [11] S. Ye, R. S. Blum, and L. J. Cimini, *Adaptive OFDM systems with imperfect channel state information*. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, pp. 3255-3265, November 2006.
- [12] J. D. Parsons. *The Mobile Radio Channel*. John Wiley, 1992.
- [13] Stefan Cavalcante Bernat Júnior. *Modulação Adaptativa Baseada na Predição da Métrica de Adaptação para Canais com Desvanecimento Plano*. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2007.
- [14] S. Vishwanath and A. Goldsmith, A. *Adaptive Turbo-Coded Modulation for Flat-Fading Channels*. Communications, IEEE Trans on Comm, Volume 51, Issue 6, June 2003.