

Modulação adaptativa: princípios e características de desempenho

*Juraci Ferreira Galdino**

Resumo

O presente artigo tem por finalidade apresentar os princípios que fundamentam as técnicas de modulação adaptativa. Tais técnicas têm recebido grande destaque na literatura especializada, em razão das boas características de desempenho que elas exibem em canais sem fio caracterizados pelo efeito desvanecimento plano e variante no tempo, particularmente quando comparadas com as técnicas de modulação convencionais.

Palavras-chave

Modulação Adaptativa, Transmissão Digital, Canais Variantes no Tempo, QAM.

Introdução

O aumento de demanda por sistemas de comunicações digitais em canais sem fio (*wireless*), bem como as restrições de largura de banda que, em geral, caracterizam esses canais, tem motivado o desenvolvimento de técnicas de transmissão digital com boas características de desempenho, particularmente no que se refere à elevada eficiência espectral, aos baixos valores de taxa de erro de *bit* e ao uso parcimonioso de potência.

Tais características de desempenho são conflitantes, uma vez que a melhoria de uma delas normalmente é acompanhada de alguma degradação nas demais. Sendo assim, é importante

estabelecer requisitos mínimos de desempenho e empregar estratégias de transmissão que propiciem boas soluções de compromisso.

Para os canais de comunicação caracterizados pelo efeito de desvanecimento variante no tempo, uma técnica que vem recebendo grande atenção na literatura especializada é a modulação adaptativa.^[1-8]

Diferentemente das técnicas de modulação clássicas, cujas constelações são fixas e dimensionadas com base nas condições de propagação severas, as técnicas de modulação adaptativa variam as constelações durante o enlace, em resposta às mudanças das condições momentâneas de propagação do canal de comunicação.

* Major do QEM, em 2005, formado em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em 1991, com mestrado em Engenharia Elétrica pelo IME, em 1997, e doutorado em sistemas de comunicações pela UFCG, em 2002. É professor e pesquisador do IME desde 2003, onde, atualmente, exerce a função de coordenador de graduação da seção de Engenharia Elétrica (SE/3).

Este artigo tem como objetivo principal apresentar subsídios para elucidar as razões do grande interesse que há em torno das técnicas de modulação adaptativa, para tal são apresentados os princípios que fundamentam essa estratégia de modulação e suas características de desempenho.

O restante deste artigo é organizado da seguinte maneira. Algumas considerações atinentes às técnicas de modulações convencionais são apresentadas em “Modulação clássica”. A “Modulação adaptativa” é voltada para a discussão das técnicas de modulações adaptativas. A determinação de parâmetros dessas técnicas e suas características de desempenho são investigadas em “Otimização dos limiares de adaptação e avaliação de desempenho”. Por fim, são apresentadas as conclusões do artigo.

Modulação clássica

Esta seção é voltada para a discussão, de forma resumida, de algumas questões ligadas às técnicas de modulação clássicas, particularmente aquelas importantes para entender a modulação adaptativa. As discussões apresentadas aqui tomam como referência as modulações QAM (do termo em inglês *Quadrature Amplitude Modulation*), pois elas são geralmente empregadas no desenvolvimento das modulações adaptativas. Inicialmente é abordado o emprego das modulações QAM em canais AWGN (do termo em inglês *Additive White Gaussian Noise*), posteriormente são tecidos alguns comentários referentes ao uso dessas modulações em canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento plano.

Como ponto de partida é considerado um sistema de comunicação digital simples, cujo canal de comunicação apenas introduz ruído na forma de onda transmitida para gerar a observação no lado de recepção.

Em geral, o ruído é modelado por um processo estacionário em sentido amplo, cuja Densidade Espectral de Potência (DEP) é constante (branco) e função densidade de probabilidade é dada por uma gaussiana de média nula. Canais com essa caracterização são tradicionalmente denominados de AWGN.

A figura 1 apresenta um diagrama de blocos simplificado de um sistema de comunicação em canal AWGN.

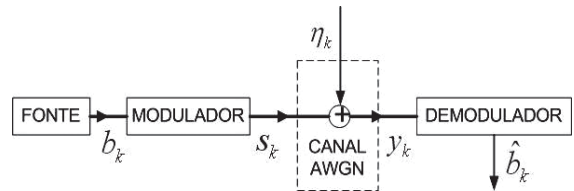


Figura 1 – Diagrama de bloco simplificado de um sistema de transmissão em canal AWGN.

A fonte gera dígitos binários (*bits*) estatisticamente independentes e igualmente prováveis, o modulador mapeia seqüências de K bits consecutivos em um dos $M = 2^k$ símbolos da constelação da modulação s_k . Para a caracterização estatística da fonte adotada aqui, os símbolos são estatisticamente independentes e equiprováveis.

A expressão da observação, y_k , em banda básica, na entrada do receptor é dada por

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

na qual o símbolo s_k é transmitido no instante de tempo kT_s , sendo T_s a duração do símbolo, ou seja, $R_s = 1/T_s$ é a velocidade de transmissão expressa em *baud*. A parcela η_k representa a amostra do ruído aditivo no instante de tempo kT_s . Assumindo que a DEP do processo ruidoso é igual a $N_0/2$, essa amostra é modelada por uma variável aleatória gaussiana de média nula e variância $\sigma_\eta^2 = N_0/2$.

O receptor, a partir da observação ruidosa e tendo conhecimento prévio da técnica de modulação adotada (constelação), produz uma

estimativa dos símbolos transmitido. Essa estimativa, que aqui é denotada por \hat{S}_k , é obtida a partir de uma regra de decisão que depende do critério adotado, sendo os critérios MAP (do termo em inglês *Maximum Probability A Posteriori*) e ML (do termo em inglês *Maximum Likelihood*) os tradicionalmente empregados.^[9]

Considerando a modulação QAM com M pontos na constelação; e o critério ML – que para a modelagem estatística aqui adotada para o ruído e *bits* gerados pela fonte atinge a mínima probabilidade de erro –, as expressões de probabilidade de erro de *bit*, $P_b(e / \gamma, M)$, podem ser escritas da seguinte forma:^[10]

$$P_b(e / \gamma, M) = \frac{1}{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{m=1}^{\log_2 \sqrt{M}} P_b(m) \quad (2)$$

sendo

$$P_b(m) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{(1-2^{-m})\sqrt{M}-1} A_{m,n} B_n$$

na qual $A_{m,n} = (-1)^{\left\lfloor \frac{n2^{m-1}}{\sqrt{M}} \right\rfloor} x \left(2^{m-1} - \left\lfloor \frac{n2^{m-1} + 1}{\sqrt{M}} \right\rfloor \right)$

e $B_n = \text{erfc} \left((2n + 1) \sqrt{\frac{3 \log_2 M \gamma}{2(M-1)}} \right)$.

Nessas equações $\text{erfc}(x)$ representa a função erro complementar de x ,^[9] $\lfloor x \rfloor$ denota a função maior inteiro menor do que x , γ representa a razão sinal ruído expressa em termos da energia média por *bit* e da DEP do ruído aditivo da seguinte maneira: $\gamma = E_b/N_o$. A energia média do *bit*, por seu turno, pode ser escrita em termos da energia média do símbolo, E_s , por meio de $E_s = E_b \times \log_2(M)$.

Outra importante figura de mérito de uma técnica de modulação digital é a eficiência espectral (EE), definida como a quantidade de *bits* por segundo (bps) por unidade de Hertz. Para a

modulação M-QAM a eficiência espectral (EE) é dada por:^[9]

$$EE = \log_2(M).$$

De acordo com essa equação, quanto maior o valor de M , ou seja, a quantidade de pontos da constelação, melhor é a eficiência espectral da modulação e, por conseguinte, maior a velocidade de transmissão para uma dada largura de banda do canal de comunicação. Por outro lado, considerando uma RSR fixa, quanto maior o valor de M piores as probabilidade de erro de *bit*, conforme pode ser constatado na figura 2.

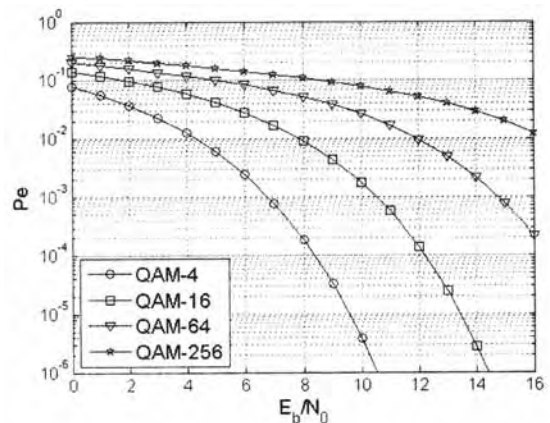


Figura 2 – Curvas de probabilidade de erro em função da RSR expressa em dB para as modulações 4, 16, 64 e 256-QAM.

Por exemplo, para obter uma probabilidade de erro de 10^{-3} com a modulação 4-QAM deve-se adotar uma RSR de 7 dB. Neste caso a EE do sistema é de 2 bps/Hz. Já para as modulações 16-QAM e 64-QAM, que possuem EE iguais a 4 e 6 bps/Hz, a referida probabilidade de erro é obtida com as RSR de 10,5 dB e 15 dB, respectivamente.

Tomando como referência uma determinada potência média de transmissão, pode-se concluir que a melhoria da EE propiciada pelo aumento

da quantidade de pontos da constelação, apresenta o inconveniente de degradar a probabilidade de erro de *bit*. Essa degradação é tão mais intensa quanto maior for a melhoria da eficiência espectral. Assim sendo, para se projetar enlaces que conjuguem elevada eficiência espectral e baixos valores de probabilidade de erro, deve-se empregar elevadas potências de transmissão.

A figura 3 apresenta um diagrama de bloco simplificado de um sistema que emprega modulação clássica e cujo canal de comunicação é caracterizado pelo efeito de desvanecimento plano e variante no tempo.

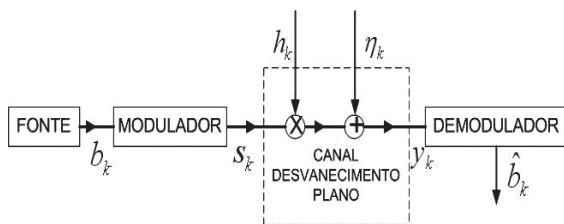


Figura 3 – Diagrama de blocos simplificado de um enlace de comunicação em canal com desvanecimento plano.

A expressão da observação, em banda básica, para esse sistema de comunicação é dada por:

$$y_k = h_k s_k + \eta_k \quad (3)$$

sendo h_k o coeficiente ou ganho do canal, que é modelado por um processo estocástico, complexo e estacionário em sentido amplo. Em geral, esse coeficiente segue uma distribuição gaussiana cujas componentes real e imaginária são independentes, de médias nulas e variâncias

* Essa caracterização é tão empregada que muitos se referem a canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento plano como canais Rayleigh.

iguais. Na forma polar, essa caracterização resulta em uma amplitude que segue uma distribuição de Rayleigh e fase com distribuição uniforme entre 0 e 2π .* Os parâmetros η_k e S_k seguem a mesma caracterização estatística do sistema AWGN.

Na literatura especializada são propostas várias modelagens estatísticas para descreverem a evolução temporal do canal de comunicação. Para os sistemas de comunicações móveis em ambientes com grande densidade demográfica, nos quais não há visibilidade direta, destaca-se a modelagem proposta por Jakes.^[11-13] De acordo com essa modelagem, a autocorrelação do coeficiente do canal é dada por uma função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero parametrizada pelo máximo deslocamento Doppler denotado por f_D .^[11-13]

Na figura 4 é apresentado 10 segundos de uma realização (função amostra) do ganho do canal em dB. Na obtenção dessa figura considerou-se espectro de Jakes, e um produto do máximo deslocamento Doppler pela duração do símbolo igual a $f_D T_s = 10^{-3}$. Tomando como referência uma taxa de 10Kbaud, durante 10 segundos transmite-se um total de 100 mil símbolos.

A curva da figura 4, embora configure um caso particular, exhibe importantes características de um canal modelado pelo espectro de Jakes, como, por exemplo, a existência de severas atenuações (profundos desvanecimentos) que podem atingir até 40 dB de atenuação em relação à potência média do canal, neste caso 0 dB. Esses profundos desvanecimentos são breves e raros, mas quando ocorrem prejudicam sobremodo o desempenho do sistema de comunicação.

Nos sistemas de comunicação em canais variantes no tempo é comum que os transmissores enviem, além dos dados, símbolos conhecidos. O receptor utiliza esses símbolos para estimar e

rastrear parâmetros por ele empregados para recuperar a mensagem, ou os dados enviados pelo transmissor. A figura 5 mostra a estrutura de quadros ou *frame* geralmente adotada. Na qual *P* denota os símbolos conhecidos, geralmente denominados de símbolos pilotos ou símbolos de treinamento.

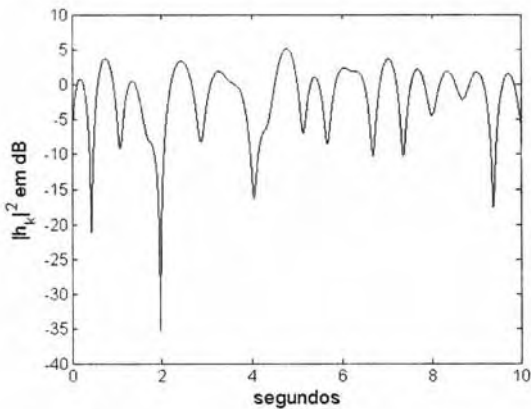


Figura 4 – Função amostra (10 segundos) de $|h_k|^2$ expressa em dB para um espalhamento Doppler de Jakes com $f_d T_s = 10^{-3}$.

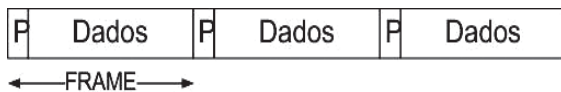


Figura 5 – Estrutura de quadros adotada em sistemas de comunicação para canais sem fio.

Quanto maior o percentual de dados contido no *frame* mais eficiente o sistema de transmissão, em razão do menor desperdício de tempo de uso do canal com símbolos que não carregam informação. Por outro lado, o espaçamento entre sucessivos blocos de treinamento ou entre símbolos pilotos não pode ser muito grande, sob pena de dificultar o rastreo de parâmetros do receptor e, por conseguinte, degradar sobremodo o desempenho do sistema de transmissão.

A quantidade de dados e símbolos conhecidos por *frame* depende da aplicação, principalmente de sua taxa de transmissão e da dinâmica do canal de comunicação.

Apesar dessa dependência, normalmente a quantidade de símbolos por bloco de dados é pequena, sendo o seu valor regulado pelas normas e padrões existentes para cada tipo específico de sistema de comunicação. Por exemplo, em sistemas de comunicações ionosféricas na faixa de HF (3 até 30 MHz) que empregam velocidade de 75 até 1.200 bps, recomenda-se 20 símbolos de dados e 20 de treinamento; para velocidades de 2.400 até 4.800 recomenda-se 32 símbolos de dados e 16 de treinamento.^[14]

Outro aspecto a ser ressaltado nos sistemas de comunicação sem fio é o fato da “qualidade” da transmissão variar ao longo do tempo, no sentido de que, quando o canal excursionsa em torno dos profundos desvanecimentos, podem ocorrer vários erros de detecção dos símbolos transmitidos, ao passo que, quando o canal propicia boas condições de propagação, esses erros tendem a se tornar mais raros. Esse comportamento gera o que se costuma denominar de erros em surto.

Em canais caracterizados pelo efeito de desvanecimento plano e variante no tempo, uma forma de quantificar a “qualidade” do enlace é por meio da RSR instantânea, RSR_k . Admitindo que o canal de comunicação é conhecido, essa RSR pode ser dada por:

$$RSR_k = |h_k|^2 \frac{E_s}{N_0} \quad (4)$$

Como E_s / N_0 descreve a RSR média do enlace, sendo um parâmetro definido no dimensionamento da camada física, vê-se então que a flutuação temporal da RSR instantânea é

determinada pela própria variação do canal. Assim sendo, essa RSR atinge valores muito baixos quando o canal se encontra em profundos desvanecimento, nesses casos, a RSR_k pode chegar a até 40 dB abaixo do valor de E_s/N_0 . Na função amostra da Figura 4, por exemplo, em torno de dois segundos o canal provoca uma atenuação de 35 dB em relação a RSR média.

Cabe mencionar que a variação da RSR instantânea entre sucessivos *frames* é pequena, em razão dos valores geralmente adotados para o tamanho dos *frames* e das elevadas taxas de transmissão atualmente praticadas.

Por exemplo, na figura 4, cujo espalhamento espectral é intenso ($f_D T = 10^{-3}$), e, portanto, crítico para análise dessa variação, mesmo assim pode-se verificar que se forem empregados tamanhos de *frame* da ordem de 100 símbolos, a variação da RSR entre *frames* sucessivos é pequena. Esse comportamento é de suma importância para as modulações adaptativas.

Considerando canal de Rayleigh conhecido, espalhamento Doppler de Jakes, modulações QAM (4, 16, 64 e 256) e o critério ML, são apresentadas na Figura 6 algumas curvas de probabilidade de erro de *bit* em função de E_b/N_0 .

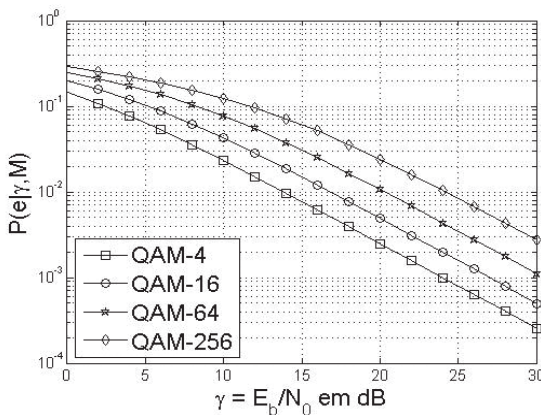


Figura 6 – Probabilidade de erro de *bit* de algumas modulações QAM em canais de Rayleigh.

Comparando os desempenhos apresentados nas figuras 2 e 6, percebe-se uma severa degradação de desempenho das curvas contidas na figura 6 em relação àqueles da figura 2. Isso ocorre especialmente em função dos profundos desvanecimentos provocados pelo canal de comunicação sem fio.

Nos sistemas que empregam as modulações clássicas, a partir da velocidade de transmissão desejada, da largura de banda disponível e da probabilidade de erro de *bit* tolerada na camada física do sistema de comunicação, a estratégia de modulação e a potência de transmissão são criteriosamente escolhidas. Uma vez realizadas essas escolhas, os parâmetros do sistema são mantidos constantes enquanto durar a transmissão.

Para os canais AWGN essa estratégia é adequada, pois a qualidade do enlace se mantém constante durante a transmissão, uma vez que a relação sinal ruído é constante e os erros se distribuem ao longo da recepção. Por outro lado, para canais com desvanecimento plano e variante no tempo, essa estratégia é inadequada, pois a qualidade do canal varia com o tempo e o desempenho fica limitado pelas condições severas do canal.

Modulação adaptativa

As técnicas de modulação clássicas, como, por exemplo, a QAM, aqui discutida sumariamente, quando aplicadas a canais Rayleigh, não utilizam de forma eficiente a largura de banda, bem como a potência de transmissão, pois, para se atingir bons desempenhos em termos de taxa de erro de *bit*, é preciso dimensionar a potência de transmissão e a cardinalidade da constelação (M) para as condições de propagação severas. É essa dificuldade que as técnicas de modulação adaptativa buscam contornar.

Em contraposição a essas técnicas, as modulações adaptativas permitem variar a constelação durante o enlace, possibilitando, dessa maneira, adaptar as formas de onda na saída do transmissor às condições de propagação do canal.

Quando o canal apresenta excelentes condições de propagação (elevadas RSR instantâneas), é possível atingir reduzidas taxas de erro usando modulações com elevada eficiência espectral. Por outro lado, quando o canal apresenta severas condições de propagação (profundas atenuações – baixos valores de RSR instantâneas), para se obter baixos valores de taxa de erro de *bit* (BER – do termo em inglês *Bit Error Rate*), deve-se adotar uma modulação com poucos pontos na constelação, e que, portanto, possuem baixa eficiência espectral.

Uma forma de quantificar as condições de propagação de um canal de comunicação plano é por meio da estimativa da RSR instantânea no lado de recepção. Essa estimativa pode ser obtida por:

$$\gamma_k = |\hat{h}_k|^2 \frac{E_s}{\hat{N}_0}, \quad (5)$$

na qual \hat{N}_0 representa uma estimativa da DEP do ruído, que pode ser obtida por meio dos critérios ML ou MAP;^[15,16] \hat{h}_k é a estimativa de h_k , que pode ser obtida usando algoritmos de filtragem adaptativa, como, por exemplo, o LMS (do termo em inglês *Least Mean Square*) e RLS (do termo em inglês *Recursive Least Square*).^[17,18]

Vale mencionar que esses parâmetros podem ser estimados usando os símbolos pilotos ou de treinamento. Além disso, cabe lembrar que para implementar as técnicas clássicas de detecção da mensagem transmitidas é preciso estimar o canal e, em alguns casos, até mesmo a variância do ruído. Assim sendo, a complexidade computacional para obter a estimativa da

RSR instantânea é pequena, e não é necessário realizar modificações na estrutura de quadros do sistemas de transmissão.

A figura 7 representa um diagrama de blocos em banda básica de um enlace de comunicação digital que emprega a técnica de modulação adaptativa.

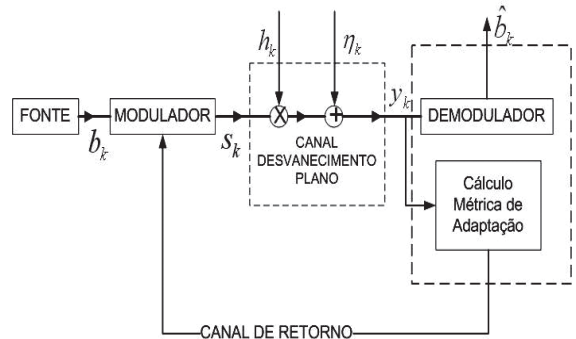


Figura 7 – Diagrama de bloco básico de um enlace dotado de modulação adaptativa.

Nesses sistemas emprega-se um conjunto de N modulações clássicas, normalmente QAM com diversas constelações, em razão do bom compromisso entre eficiência espectral e probabilidade de erro de *bit* que essa modulação oferece.^[9]

Assim sendo, K_i bits da fonte binária, para $i = 1 \dots N$, são mapeados em um dos $M_i = 2^{K_i}$ pontos ou símbolos s_k de uma constelação QAM- M_i . Todas as constelações possuem energia média iguais a E_s . A escolha da modulação a ser empregada em cada *frame* é realizada com o apoio do receptor, como explicado adiante.

Após a modulação o sinal é transmitido ao receptor através de um canal que distorce e corrompe com ruído a forma de onda transmitida, conforme a equação 4.

O sinal recebido, y_k , é empregado para detectar a informação transmitida, e também para estimar a RSR instantânea. Essa estimativa pode

ser obtida pela equação 5 durante os blocos de treinamento ou nos instantes em que são recebidos os símbolos pilotos e deve ser enviada ao transmissor através do canal de retorno. Aqui é admitido que este canal é ideal, ou seja, não apresenta erros e atraso. Normalmente esta última condição pode ser atingida com o uso de sofisticadas estratégias de codificação de canal.

Como mencionado em “Modulação Clássica”, as variações de RSR instantânea entre quadros vizinhos é normalmente pequena. Assim sendo, a estimativa desse parâmetro obtida em um determinado bloco pode descrever com boa fidelidade a situação do canal no próximo bloco de dados. É com base nessa correlação que as estratégias de modulação adaptativa se baseiam.^[19]

Conforme discutido em “Modulação adaptativa”, quando maior for γ_p , melhores as condições de recepção, viabilizando o uso de constelações maiores sem comprometer o processo de detecção da informação transmitida. Assim sendo, são estabelecidas regiões de decisão R_p , cada uma delas vinculada a uma constelação específica.

Seja $C = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ o conjunto dos $N + 1$ limiares que definem as N regiões de decisão. Em geral, $\lambda_0 = 0$ e $\lambda_N = \infty$, e os demais são números reais positivos que representam valores de RSR e seguem a seguinte regra $\lambda_i > \lambda_{i-1}$ para $i = 1 \dots N - 1$.

A partir desses limiares, tem-se que a modulação QAM- M_i é adotada quanto $\lambda_{i-1} \leq \gamma_i < \lambda_i$. A tabela 1 apresenta uma possível estratégia de modulação adaptativa para $N = 5$.

Entre as estratégias de modulação empregadas na tabela 1, a primeira delas implica que não seja realizada transmissão se o RSR instantânea estimada for igual ou inferior a um valor crítico (λ_1).

Tabela 1 – Um exemplo de regiões de decisão para uma modulação adaptativa com cinco estratégias de transmissão.

Modulação	Região de decisão
0	$\gamma_i \leq \lambda_1$
QAM-4	$\lambda_1 < \gamma_i \leq \lambda_2$
QAM-16	$\lambda_2 < \gamma_i \leq \lambda_3$
QAM-64	$\lambda_3 < \gamma_i \leq \lambda_4$
QAM-256	$\gamma_i \geq \lambda_4$

Como ilustrado na figura 7, essa estratégia de modulação requer o emprego de um canal de retorno, através do qual estimativas do estado do canal (RSR instantânea), obtidas no receptor, são enviadas para o transmissor para fins de seleção da constelação a ser adotada na transmissão do próximo bloco de dados. Essa escolha depende não apenas dessas estimativas, mas também da probabilidade de erro almejada pelo sistema de comunicação, que doravante será denominada de *probabilidade de erro alvo* (PEA); das constelações disponíveis no sistema de transmissão; e, principalmente, dos limiares de adaptação λ_p .

O desempenho da modulação adaptativa depende fortemente dos valores dos limiares de adaptação. Esses valores devem ser criteriosamente escolhidos para explorar plenamente as boas expectativas de desempenho que as técnicas de modulação adaptativa propiciam.

Otimização dos limiares de adaptação e avaliação de desempenho

As técnicas de modulação adaptativa buscam maximizar a eficiência espectral (EE), atendendo a um requisito de taxa de erro (PEA), como mencionado anteriormente. Trata-se, portanto, de um problema de otimização não linear,

cujos parâmetros a serem otimizados para um dado conjunto de N estratégias são os limiares de adaptação.^[20-22]

A probabilidade de erro de *bit* da técnica de modulação adaptativa para canal com desvanecimento plano pode ser escrita da seguinte maneira:

$$P(e/\gamma) = \frac{1}{EE(\gamma)} \sum_{i=1}^N K_i PE_i(\gamma) \quad (6)$$

sendo $PE_i(\gamma)$ a probabilidade de erro de *bit* em canal Rayleigh com a modulação QAM- M_i . Essa probabilidade pode ser expressa da seguinte maneira:

$$PE_i(\gamma) = \int_{\lambda_{i-1}}^{\lambda_i} P_b(e/M_i, \alpha) f(\gamma, \alpha) d\alpha, \quad (7)$$

na qual $P_b(e/\gamma, M_i)$ denota a probabilidade de erro de *bit* das técnicas de modulação QAM- M_i em canal AWGN (equação 2) e $f(\gamma, \alpha)$ representa a função densidade de probabilidade (fdp) da RSR instantânea para uma relação RSR média $\gamma = E_b/N_0$. Considerando canal de Rayleigh essa fdp é dada por:^[9]

$$f(\gamma, \alpha) = \frac{1}{\gamma} e^{-\frac{\alpha}{\gamma}}. \quad (8)$$

Ainda com referência à equação 6, $EE(\gamma)$ denota a eficiência espectral média para uma RSR média γ . Essa figura de mérito pode ser escrita da seguinte maneira.

$$EE(\gamma) = \sum_{i=1}^N K_i \int_{\lambda_{i-1}}^{\lambda_i} f(\gamma, \alpha) d\alpha \quad (9)$$

Os limiares de adaptação são obtidos resolvendo um problema de otimização com

* Os valores dos limiares foram obtidos empregando funções do *toolbox* de otimização do Matlab.

restrição, em que se procura maximizar a eficiência espectral, equação 9, sujeito à restrição de que $P(e/\gamma) \leq PEA$.

O valor de PEA 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.

A seguir são apresentados resultados analíticos da modulação adaptativa, em termos da probabilidade de erro de *bit* e eficiência espectral.

Considerando nessa análise a estratégia de modulação adaptativa descrita na tabela 1, uma PEA de 10^{-2} e canal de Rayleigh. Os limiares de adaptação são os seguintes: $\lambda_1 = 2,0784$ em dB, $\lambda_2 = 5,4163$, $\lambda_3 = 11,4764$ e $\lambda_4 = 25,6320$, ou 3,1773, 7,337, 10,5981 e 14,0878 em dB, respectivamente.*

A figura 8 apresenta não apenas a curva de probabilidade de erro de *bit* da modulação adaptativa, mas também curvas referentes às modulações 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM convencionais. Tais curvas foram incluídas para fins de comparação de desempenho das técnicas convencionais com a modulação adaptativa.

Inicialmente verifica-se que a modulação adaptativa atende à restrição PEA em toda a faixa de RSR média considerada. Até 14 dB essa técnica de modulação apresenta os melhores valores de probabilidade de erro, e, a partir de 18 dB, seu desempenho se equivale ao da modulação 16-QAM.

Na figura 9 são apresentadas curvas de eficiência espectral para o sistema que emprega modulação adaptativa. Novamente, para fins de comparação de desempenho, são incluídas curvas de EE para as modulações clássicas.

Verifica-se que a partir de 11 dB a técnica de modulação adaptativa apresenta melhor eficiência espectral do que a modulação 16-QAM. A partir de 16 dB essa eficiência é superior à da modulação 64-QAM e se aproxima da EE da modulação 256-QAM com o aumento da RSR.

Em suma, a modulação adaptativa possui probabilidade de erro sempre melhor ou igual à da modulação 16-QAM, ao mesmo tempo em que apresenta uma EE bem superior a desta modulação para valores de RSR superiores a 11dB. Análises similares podem ser realizadas tomando como base outras modulações fixas.

Essas figuras mostram nítida vantagem de desempenho da modulação adaptativa em relação às modulações convencionais. Isso é fruto da possibilidade de se adotar uma modulação mais conservadora, ou até mesmo a de não realizar transmissões quando o canal excursiona pelos profundos desvanecimentos, reduzindo assim as taxas de erro. Ao mesmo tempo em que são adotadas modulações com muitos pontos na constelação quando o canal oferece boas condições de propagação. Dessa forma, beneficiando a EE sem comprometer sobremodo a taxa de erro.

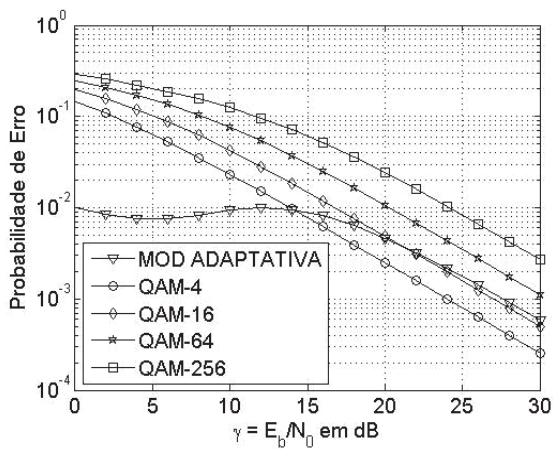


Figura 8 – Probabilidade de erro de bit para modulações QAM e Adaptativa.

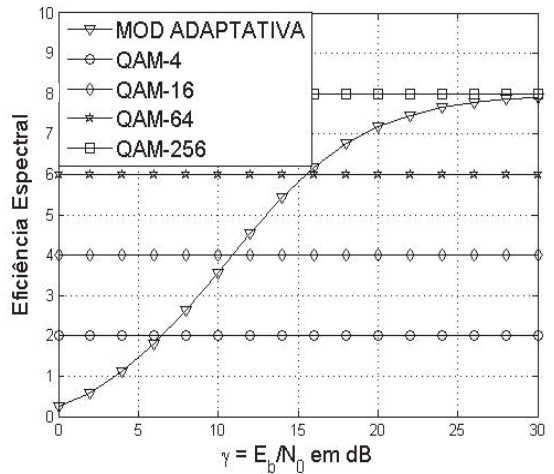


Figura 9 – Eficiência espectral para modulações QAM e Adaptativa.

Conclusão

Os sistemas de comunicação que empregam técnicas de modulação fixa, e cujos canais variam com o tempo, fazem uso ineficiente da largura de banda e da potência de transmissão, uma vez que seus parâmetros são dimensionados com base nas condições de propagação severas.

Diferentemente dessas abordagens, as técnicas de modulação adaptativa variam o tamanho da constelação de acordo com as condições de propagação do canal. Quando os canais oferecem boas condições de propagação, tais técnicas adotam uma modulação com muitos pontos na constelação, favorecendo a eficiência espectral do enlace sem comprometer sobremodo a sua taxa de erro. Por outro lado, na presença de profundos desvanecimentos, essas técnicas utilizam modulações com pequena cardinalidade, beneficiando a taxa de erro exibida no enlace.


Assim procedendo, na média, as técnicas de modulação adaptativa propiciam melhores características de desempenho do que as

modulações clássicas. Os sistemas nelas baseadas, para uma dada potência de transmissão e largura de banda, geralmente apresentam melhores velocidades de transmissão ao mesmo tempo em que atendem a requisitos de probabilidade de erro.

Apesar das melhores características de desempenho exibidas pela modulação adaptativa em relação às técnicas de modulações clássicas, vale destacar que a primeira apresenta maior complexidade computacional em relação às segundas. Esse fato advém da necessidade de se empregar uma técnica para estimar o parâmetro de adaptação no receptor e da necessidade de um canal de retorno, através do qual

esse parâmetro deve ser enviado ao transmissor. Além disso, as modulações adaptativas fornecem uma taxa de transmissão variante no tempo, em função da própria dinâmica do canal de comunicação.

Portanto, o uso da técnica de modulação adaptativa não é indicado nas aplicações em que não se dispõe de canal de retorno, ou naquelas cujo fluxo de dados deve ser mantido constante.

Algumas aplicações das modulações adaptativas e temas de pesquisa em aberto nessa área são objeto de outro artigo, cuja publicação dar-se-á no próximo número da *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*. 

Referências

- [1] Hossain, M. J., Vitthaladevuni, P. K., Alouimi, M-S., Bhargava, V. K., and Goldsmith, A. J., "Adaptive Hierarchical Modulation for Simultaneous Voice and Multiclass Data Transmission Over Fading Channels", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, nº 4, July, pp. 1181-1194, 2006.
- [2] Chung, S. T. and Goldsmith, A., "Degrees of Freedom in Adaptive Modulation: A Unified View", IEEE Transactions on Communications, vol. 49, nº 9, September, pp. 1561-1571, 2001
- [3] Alouini, M. S., Goldsmith, "Capacity of Rayleigh Fading Channels under Different Adaptive Transmission and Diversity-Combining Techniques", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 48, nº 4, pp. 1165-1181, July 1999.
- [4] Falahati, S., Svensson, A., Ekam, T. and Sternad, M., "Adaptive Modulation Systems for Predicted Wireless Channels", IEEE Trans. Comm., vol. 52, nº 2, pp. 307-316, Feb. 2004.
- [5] Shengli Zhou, Georgios B. Giannakis, "Adaptive Modulation for Multiantenna Transmissions With Channel Mean Feedback", IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, vol. 3, nº 5, September 2004, 1626-1636.
- [6] Rhee, D., Kwon, J. H., Kwang., H. K. and Kim, K. S., "Adaptive Modulation e Coding on Multipath Rayleigh Fading Channels Based on Channel Prediction", ICACT, pp. 195-199, 2006.
- [7] Cai, X., and Giannakis, G. B., "Adaptive PSAM Accounting for Channel Estimation and Prediction Errors", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, nº 1, pp. 246-256, January, 2005.
- [8] Ekpenyong, A. E., Huang, Y-F, "Feedback Constraints for Adaptive Transmission", IEEE Signal Processing Magazine, pp. 69-78, May, 2007.
- [9] Proakis, J. G. Digital Communications, McGraw-Hill, 4ª Ed., 2000
- [10] Cho, K.; Yoon, D., "On the General BER Expression of One and two dimensional Amplitude Modulation, IEEE Trans. Comm, Vol. 50, nº 7, July 2002.
- [11] Parsons, J. D., The Mobile Radio Channel. John Wiley, 1992.
- [12] Sklar, B., " Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems.I. Characterization", IEEE Communications Magazine, Vol. 35, Jul., 1997, 90-100.
- [13] Sklar, B., " Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems.II. Mitigation", IEEE Communications Magazine, Vol. 35, Jul., 1997,102-109.
- [14] MIL-STD-188-110B, Interoperability and Performance Standards for Data Modems, 27 April 2000.

- [15] Kay, S. M., Fundamentals of Statistical Processing, Volume I: Estimation Theory, Prentice Hall PTR, 1993.
- [16] Van Tress, H. L., Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I, Wiley-Interscience, 2001.
- [17] Haykin, S. S., Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, 4ª Edição - 2001
- [18] Diniz, P. S. R., Adaptive Filtering, Kluwer Academic, 2ª Edição - 2002
- [19] Junior, S. B., Pinto, E. L. e Galdino, J. F., "Autocorrelação de um Estimador da Razão Sinal-Ruído para Adaptação de Modulação", Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, pp 1-6, 2007.
- [20] Galdino, J. F., Gurjão, E. C., "Otimização de Limiares para Adaptação de Modulação Diante de Erros no Canal de Retorno, submetido ao XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Setembro, 2008, 1-6.
- [21] Torrance, J. M., and Hanzo, L., "Optimization of Switching Levels for Adaptive Modulation in Slow Rayleigh Fading", Electronics Letters, vol. 32, nº 13, pp. 1167-1169, Jun. 1996.
- [22] Ekpenyoung, A. E.; Huang, Y-F "Feedback-Detection Strategies for Adaptive Modulation Systems". IEEE Transactions on Communications, vol. 54, nº 10, pp. 1735-1740, October, 2006.

**“Eduquem-se os menores e não será
preciso castigar os homens.”**

Pitágoras

**“Basta refletir sobre a dúvida para ver
claramente que duvidar é pensar
e que pensar é existir.”**

Descartes