



Avaliação da Rotação de Constelações 4-QAM e 16-QAM em Canais com Desvanecimento Rice¹

Mariana F. Mota², Carlos D. M. Regis³, Rafael F. Lopes⁴ e Marcelo S. Alencar⁵

¹Parte do projeto de pesquisa PIBICT.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Brasil. e-mail: marianaf.mota@gmail.com

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Brasil. e-mail: regis.danilo@gmail.com

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Brasil. e-mail: rafaelf@ifma.edu.br

⁵Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. e-mail: malencar@dee.ufcg.edu.br

Resumo: Desvanecimento causado por multipercurso em comunicação sem fio pode degradar o desempenho de uma comunicação em um sistema digital. Diversas técnicas têm sido propostas para melhorar no desempenho, incluindo a rotação da constelação. A rotação da constelação é uma técnica que introduz redundância através de uma escolha cuidadosa do ângulo de constelação de referência. Este artigo apresenta uma avaliação do que é a técnica considerando a transmissão por meio de um canal Rice, que é suficientemente flexível para representarem ambientes de transmissão diferentes (área aberta, suburbana, urbana com baixa densidade e urbana com média densidade.). Os ângulos ideais de rotação de um regime de 4-QAM e 16-QAM foram obtidos para esses ambientes.

Palavras-chave: 4-QAM, 16-QAM, Canal de desvanecimento Rice, Modulação, Rotação da Constelação

Introdução

Nas comunicações móveis, quando há uma linha de visada (LOS) entre o transmissor e o receptor. Esse sinal recebido é conhecido por ter a distribuição Rice [1]. A relação entre as componentes de visada direta e a componente difusa é dada pelo o fator de Rice, K , que mede a intensidade relativa da componente de visada direta, e, portanto, é uma medida da qualidade da transmissão. O valor do fator de Rice é uma medida de desvanecimento, com $K = 0$ sendo o pior caso do desvanecimento (Rayleigh fading) e $K = \infty$ representando a ausência de desvanecimento. Várias técnicas têm sido propostas para melhorar seu desempenho. Entre elas, as técnicas de diversidade, os esquemas de modulação codificada e a rotação da constelação.

A rotação da constelação é uma técnica que consiste em introduzir redundância por meio de uma escolha criteriosa do ângulo de referência de uma constelação QAM, combinada com o entrelaçamento independente das componentes dos símbolos a serem transmitidos.

Essa técnica pode melhorar o desempenho de sistemas de comunicações móveis considerando a ausência de erros de estimação da resposta ao impulso (RI). Este artigo apresenta o desempenho da rotação da constelação de 4-QAM e 16-QAM, a escolha do ângulo ótimo para diferentes ambientes e do efeito da rotação sobre a taxa de erro de bits (BER).

Material e Métodos

Rotação de Constelação

O método para reduzir os efeitos dos desvanecimentos é a técnica que consiste em introduzir redundância por meio de uma escolha adequada do ângulo de referência de uma constelação QAM combinada com o entrelaçamento independente das componentes dos símbolos a serem transmitidos, que pode ser chamada de diversidade de modulação ou rotação da constelação.

O esquema QAM foi primeiro proposto por C. R. Cahn, em 1960 [2]. Ele estendeu a modulação de fase para modulação em fase com múltiplas amplitudes. Isto é, há mais de uma amplitude associada a uma fase. Neste esquema, o sinal transmitido é dado por

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n p(t - nT_s) \cos(\omega_c t) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n p(t - nT_s) \sin(\omega_c t) \quad (1)$$

em que,

$$a_n, b_n = \pm d, \pm 3d, \dots, \pm(\sqrt{M} - 1)d$$



$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

em que ω_c e A são a frequência e a amplitude da portadora, respectivamente.

Pode ser observado a partir da Equação 1 que a informação transmitida em uma componente é independente da informação transmitida na outra. Além do mais, a transmissão dos sinais em canais com desvanecimento independente pode introduzir um ganho de diversidade se houver redundância entre as duas componentes. A introdução de redundância no esquema QAM pode ser realizada combinando a escolha do ângulo de referência da constelação de sinais θ com o entrelaçamento independente das componentes [3].

No processo de entrelaçamento, as componentes em fase e quadratura de um símbolo transmitido são afetados por desvanecimentos independentes. O resultado dessa técnica é aumentar a robustez do receptor em cenários de propagação com profundo desvanecimento. Para a constelação rotacionada, o sinal transmitido pode ser escrito como

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n p(t - nT_s) \cos(\omega_c t) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y_n - k p(t - nT_s) \sin(\omega_c t) \quad (2)$$

na qual k é um inteiro que representa o atraso (expresso em número de símbolos) introduzido pelo entrelaçamento entre as componentes I e Q . Além disso

$$x_n = a_n \cos \theta - b_n \sin \theta \quad (3a)$$

e

$$y_n = a_n \sin \theta + b_n \cos \theta \quad (3b)$$

são os novos símbolos QAM.

O ganho de desempenho proporcionado por essa técnica é fundamentado nos picos dos desvanecimentos serem profundos, mas de curta duração, eles podem degradar toda informação (componentes em fase e em quadratura de um símbolo) em uma transmissão convencional. Isto dificilmente ocorre com o uso da constelação rotacionada, pois as componentes de um símbolo são transmitidas em instantes de tempo distintos e existe redundância entre as componentes em fase e quadratura.

O ganho de desempenho obtido quando se utiliza constelações rotacionadas depende da escolha do ângulo de rotação. O ângulo de rotação ótimo depende da modulação escolhida e do tipo de canal. Uma característica interessante desse esquema é que o valor de θ não influencia o desempenho do sistema quando os sinais transmitidos são afetados apenas pelo ruído gaussiano branco (canal AWGN), pois a distância euclidiana entre os símbolos da constelação não depende do ângulo θ .

Canal de Comunicação com Desvanecimento Rice

Em comunicações móveis terrestres o canal de comunicações é constituído por todo o meio físico existente entre o transmissor e o receptor. Quando diferentes componentes de onda incidem sobre o móvel com amplitudes aproximadamente iguais e ângulos de chegadas uniformemente distribuídos devido ao espalhamento sofrido pelo sinal na vizinhança do móvel, o sinal no receptor tem uma envoltória com distribuição Rayleigh.

Porém, se houver uma componente incidindo sobre o móvel, diretamente ou por reflexão, com uma potência maior que as demais, então o sinal no receptor tem uma envoltória com distribuição Rice. A componente com potência predominante recebe o nome da componente direta ou componente especular, ou ainda componente LOS.

Essa situação de propagação tem sido comumente observada em ambiente microcelular, podendo ocorrer em macrocélulas quando houver linha de visada na transmissão, em canais de comunicação móvel via satélite, entre outros.

A distribuição Rice é

$$f_{|u|}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A_0^2}{\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA_0}{\sigma^2}\right), r \geq 0. \quad (4)$$



Reescrevendo $f_{|u|}(r)$ como função do valor médio quadrático b_R e o fator K , tem-se

$$f_{|u|}(r) = \frac{2r(K+1)}{b_R} \exp\left(-K - \frac{r^2(K+1)}{b_R}\right) I_0\left(2r \sqrt{\frac{K(K+1)}{b_R}}\right), r \geq 0, \quad (5)$$

Modelo Computacional

Para gerar numericamente os coeficientes do desvanecimento Rice deve-se somar uma componente especular aos coeficientes de desvanecimento Rayleigh. Assim, os coeficientes discretos de desvanecimento Rice podem ser dados por

$$u[n] = L_1(nT_s) + c[n] = A_0 e^{j(\omega n T_s + \phi)} + c[n]. \quad (6)$$

Para os parâmetros K e b_R pode-se obter A_0 e σ^2 [14]:

$$A_0 = \sqrt{\frac{K}{K+1}} b_R \quad \text{and} \quad \sigma^2 = \frac{1}{2(K+1)} b_R. \quad (7)$$

A partir da Equação 7 são obtidos os fatores do processo gaussiano complexo, dado por $\alpha = X + jY$, em que as componentes real e imaginária apresentam média μ e desvio padrão σ , *i.e.*, $X, Y \sim N(\mu, \sigma^2)$, com média e desvio padrão dado por

$$\mu = \sqrt{\frac{K}{2(K+1)}}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{2(K+1)}}. \quad (8)$$

Estimação do fator K

O fator K foi determinado experimentalmente medindo a resposta de impulso do canal. Em [4] medidas foram tomadas em Ottawa, Canadá, a 900 MHz, para um raio de 30 km, com uma antena da estação base de 33,5 metros de altura. Quatro tipos de ambiente foram considerados: área aberta, suburbano, baixo e densidade média urbana.

Nesses ambientes, o modelo de canal Rice é mais apropriado para descrever estatisticamente os dados coletados, indicando a presença de um componente especular entre o transmissor e o receptor. Tabela 1 reproduz alguns resultados de [4], eles foram usados para determinar os valores de K em diferentes ambientes.

Tabela 1 - Parâmetros estimados para a distribuição de Rice [4].

Ambiente	A_0	σ	K (dB)
Área aberta	0,9615	0,26910	8,0504
Suburbana	0,9514	0,29960	7,0261
Urbana baixa densidade	0,9256	0,36167	5,1519
Urbana média densidade	0,9022	0,40555	3,9349

Resultados e Discussão

Avaliação da Rotação da Constelação

Esta seção apresenta as simulações e a discussão dos resultados obtidos. Na simulação foram considerados a rotação da constelação e seu efeito em canais com diferentes parâmetros de Rice para 4-QAM e 16-QAM.

Avaliação do ângulo ótimo de rotação

Para avaliar o ângulo ótimo na transmissão foram utilizados os esquemas de modulação 4-QAM e 16-QAM. Esses esquemas de modulação foram usados por serem os usados no sistema de televisão digital adotado no Brasil (ISDB-Tb – *Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial built-in*) [5], [6].

Para cada um dos esquemas de modulação foram variados os ângulos de 0 a 45° usando os valores de Rice listados na Tabela 1. A variação do parâmetro K de Rice é referente às diferentes regiões apresentadas na Tabela 1. Para todos os parâmetros de Rice utilizados percebe-se que o ângulo ótimo está na faixa de 27° a 29°, como apresentado na Figura 2.

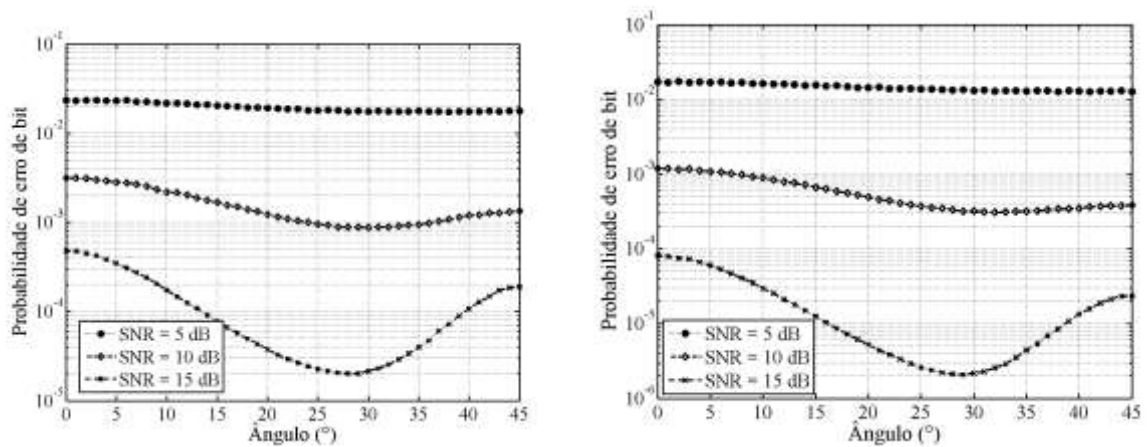


Figura 1 - Gráfico do ângulo ótimo para o esquema de modulação 4-QAM em um canal Rice. Lado esquerdo para $K = 5,15$ e lado direito para $K = 8,05$.

Observando a Figura 1 é possível verificar que com aumento do fator de Rice, K , sua escolha se torna mais importante. Uma vez que para o $K = 0$ existe uma região de pontos quase plana, enquanto que para os outros valores de K essa região é menor, tornando necessária uma escolha criteriosa do ângulo.

No esquema de modulação 16-QAM a variação do parâmetro K de Rice ocorre de acordo com a Tabela 1. Para esse esquema de modulação surgem três regiões com bons desempenhos, descritas na Figura 1. As três regiões são formadas em torno dos ângulos $16,8^\circ$, 21° e 32° .

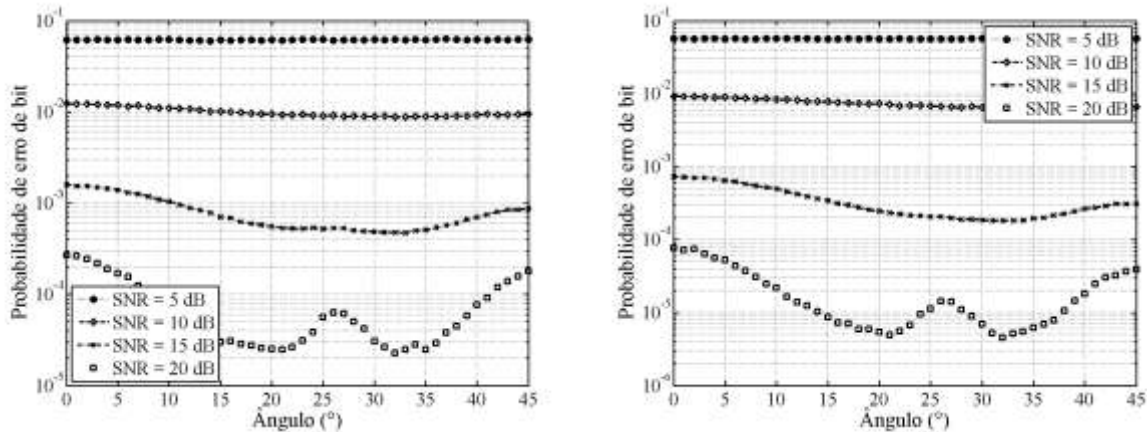


Figura 2- Gráfico do ângulo ótimo para o esquema de modulação 16-QAM em um canal Rice. Lado esquerdo para $K = 5,15$ e lado direito para $K = 7,02$.

Na medida em que K aumenta verifica-se que a região do ângulo $16,8^\circ$ não tem um comportamento tão bom quanto em torno de 21° e 32° .

Avaliação da Taxa de erro de Bit (BER)

Para uma melhor avaliação do ângulo ótimo para a transmissão foram traçadas as curvas da BER para os melhores ângulos encontrados. Para que possa ser feita uma comparação com o sistema DVB-T2 (*Digital Video Broadcast Terrestrial*), que já utiliza a rotação da constelação, foram acrescentados os ângulos usados neste sistema.

Para a avaliação da BER do esquema de modulação 4-QAM foram utilizados os valores de K de acordo com a Tabela 1, variando o ângulo de rotação para os valores de 0° , 27° , 28° e 29° , como pode ser visto na Figura 4. O ângulo 0° foi escolhido para que se possa realizar uma comparação com o sistema sem o uso do ângulo ótimo. O ângulo usado no DVB-T2 é de 29° .

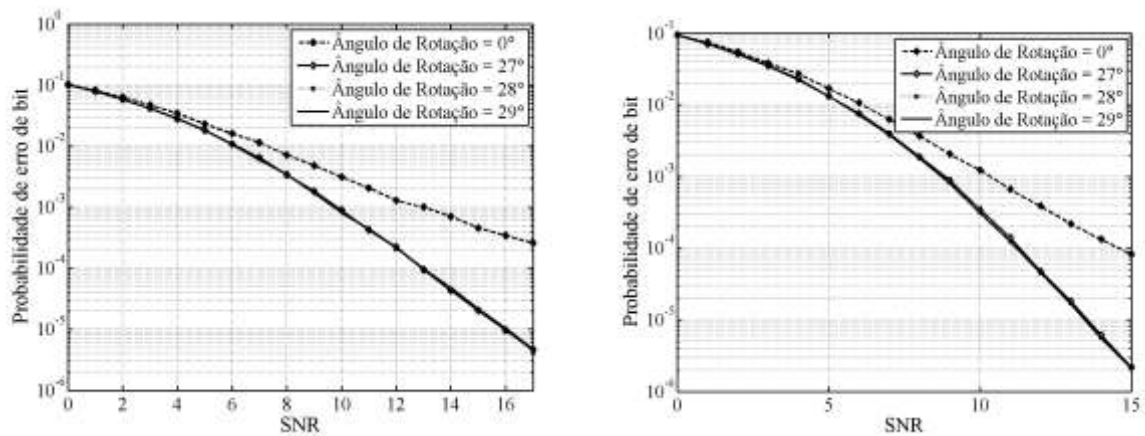


Figura 3 - Gráfico da BER para o esquema de modulação 4-QAM em um canal Rice. Lado esquerdo para $K = 5,15$ e lado direito para $K = 8,05$.

Observando a Figura 3 não é possível detectar diferenças entre as curvas geradas com os ângulos de 27°, 28° e 29°. Em relação à transmissão sem a rotação da constelação o ganho da rotação é de 4 dB para uma SNR de 10 dB.

Para a avaliação da BER do esquema de modulação 16-QAM foram utilizados os valores de K de acordo com a Tabela 1, variando o ângulo de rotação para os valores de 0°, 16,8°, 21° e 31° como podem ser visto na Figura 4. O ângulo 0° foi escolhido para que se possa realizar uma comparação com o sistema sem o uso do ângulo ótimo. O ângulo usado no DVB-T2 é de 16,8°.

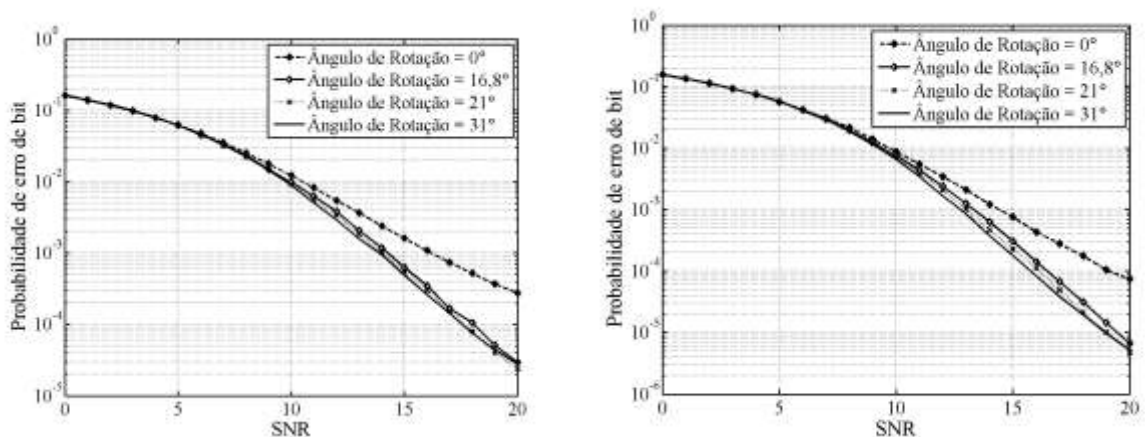


Figura 4 - Gráfico da BER para o esquema de modulação 16-QAM em um canal Rice. Lado esquerdo para $K = 5,15$ e lado direito para $K = 7,02$.

Observando a Figura 4 não é possível definir o melhor ângulo, já que todos os ângulos avaliados têm o mesmo comportamento. O ganho do uso da rotação da constelação chega a 7 dB para uma SNR de 20 dB. Comparando a curva do ângulo 31°, que obteve os melhores resultados, com a curva sem a rotação há um ganho de até 3 dB. Observa-se também que as curvas com e sem rotação se diferenciam para SNRs maiores que 12 dB.

Conclusões

Este artigo apresenta a técnica de rotação da constelação, que melhorar o desempenho de sistemas de comunicações móveis em canais de comunicações sujeitos aos efeitos do desvanecimento plano. Os canais de comunicações móveis podem ser diferenciados por existir uma linha de visada (LOS) entre o transmissor e o receptor e a componente de múltiplos percursos, ou só os múltiplos percursos. O sinal recebido com visada direta, além da componente de múltiplos percursos, é conhecido por ter a distribuição Rice. Neste artigo foi mostrado como é possível encontrar o valor de K para diferentes situações. A estimação do K apresentada leva



em consideração a temporada climática, a altura da antena e a largura do feixe da antena. Também foram apresentados os valores de K obtidos por medições em quatro diferentes ambientes. A partir dessas medições é possível saber o valor de K para os ambientes de área aberta ($K = 8,05$), de área suburbana ($K = 7,03$), área urbana de baixa renda ($K = 5,15$), área urbana de média densidade ($K = 3,93$) e área urbana de alta densidade ($K = 0$). Os resultados apresentados mostram algumas opções para a escolha do ângulo de rotação para os esquemas de modulação 4-QAM e 16-QAM. Para o 4-QAM os melhores resultados foram 27° , 28° e 29° . Para o 16-QAM os melhores resultados foram para os ângulos $16,8^\circ$, 21° e 31° .

Referências

- [1] A. Doukas and G. Kalivas, “Rician K Factor Estimation for Wireless Communication Systems,” in International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC '06, 2006, p. 69.
- [2] C. Cahn, “Combined digital phase and amplitude modulation communication systems,” IRE Transactions on Communications Systems, vol. 8, no. 3, pp. 150–155, september 1960.
- [3] S. B. Slimane, “An improved PSK scheme for fading channels,” vol. 47, no. 2, pp. 703–710, May 1998.
- [4] M. Lecours, J.-Y. Chouinard, G. Delisle, and J. Roy, “Statistical modeling of the received signal envelope in a mobile radio channel,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 37, no. 4, pp. 204–212, nov 1988.
- [5] M. Takada and M. Saito, “Transmission system for ISDB-T,” Proceedings of the IEEE, vol. 94, no. 1, pp. 251–256, Jan. 2006.
- [6] ABNT, “ABNT NBR 15602-2, Digital terrestrial television – Video coding, audio coding and multiplexing – Part 2: Audio coding,” November 2007.