

Análise das características de sinais para Classificação Automática de Modulação

Ronny S. R. Milléo, Adenilson F. de Castro, Luis Henrique A. Lolis, André Augusto Mariano
Grupo de Concepção de Circuitos e Sistemas Integrados
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
ronnymilleo@ufpr.br

Resumo—Um sistema de Classificação Automática de Modulação combina características de um sinal de tal modo que possa identificar a modulação empregada na transmissão dos dados. Para tanto, pode fazer uso de atributos estatísticos e de comportamento, tanto no tempo, bem como na frequência e combiná-los de forma que seus resultados sejam otimizados. Desta forma, este artigo descreve o estudo inicial de alguns atributos principais presentes na literatura e que podem ser utilizados para a classificação. No estudo, procurou-se avaliar o comportamento das características levando em consideração diferentes níveis de ruído, assim como uma grande quantidade de amostras de sinais modulados em amplitude, fase e frequência, fazendo uso de ferramentas matemáticas de simulação, permitindo, assim, a observação dos diferentes comportamentos e a escolha dos parâmetros adequados para a construção do sistema completo.

I. INTRODUÇÃO

A Classificação Automática de Modulação tem por objetivo identificar, de maneira automática, a modulação empregada na transmissão de um determinado sinal, de tal modo que possibilite a demodulação e posterior recuperação das informações transmitidas. Para tanto, dois diferentes métodos podem ser utilizados [1]: funções de verossimilhança (*Likelihood-based Method*) e análise das características do sinal (*Feature-based Method*). A classificação feita utilizando a técnica de verossimilhança é capaz de entregar resultados muito precisos, sob o custo de serem utilizados cálculos complexos. Já a análise feita a partir das características do sinal, permite a obtenção de resultados próximos aos encontrados com a verossimilhança, com a vantagem de que a complexidade computacional envolvida para a sua execução seja menor. Desta forma, para o desenvolvimento dos algoritmos de classificação desta pesquisa, adotaram-se as características do sinal como ponto de partida.

A análise dos atributos de um sinal pode levar em conta diferentes medidas estatísticas, como a amplitude instantânea, fase, frequência, densidade espectral de potência, dentre outras, além de ser possível a adoção de distintos algoritmos para a classificação da modulação

utilizada, como árvores de decisão e algoritmos inteligentes [1][2]. Neste artigo, entretanto, optou-se pela utilização de 9 características principais, distintas entre si pela capacidade de verificação tanto no domínio do tempo, bem como na frequência, além de análises estatísticas. Deste modo, procurou-se entender o comportamento destas características em modulações de amplitude e fase, além do desempenho em diferentes condições, aplicando-se diferentes relações de SNR (*Signal-to-noise Ratio*). O estudo detalhado da performance destas características foi executado em um ambiente simulado, fazendo uso de ferramentas matemáticas, como o Matlab® e a sua *Communication Toolbox*. Os resultados das métricas aqui abordadas tem por objetivo guiar a construção de um sistema de classificação, explicitando as vantagens e desvantagens de cada uma e como elas podem ser utilizadas para distinguir diferentes sinais.

II. ATRIBUTOS DOS SINAIS

Para que se possa comparar corretamente os cálculos dos atributos dos sinais modulados é necessário que seja feita uma normalização dos dados. A normalização requerida para fazer o cálculo dos atributos é:

$$A_{cn} = \frac{A}{m_A} - 1 \quad (1)$$

Onde A_{cn} é a amplitude normalizada-centralizada, A é a amplitude do sinal e m_A é a sua média. Além dessa normalização, alguns cálculos demandam que seja configurado um valor de limiar, A_t , em que o sinal de entrada é considerado fraco quando se encontra abaixo deste limiar. A justificativa é que o sinal muito fraco é mais suscetível ao ruído, portanto, deve-se considerar apenas as partes fortes do sinal de entrada. A escolha dos atributos analisados nesse estudo tem como base a implementação feita em trabalhos semelhantes [1][3][4][5], em que, como explicitado anteriormente, tais atributos são capazes de fornecer resultados relevantes sem que a complexidade computacional envolvida em sua determinação comprometa a sua implementação em sistemas com recursos limitados, como é o caso de microprocessadores ou até inviabilizar

a sua elaboração em *hardware* reconfigurável, por exemplo, FPGA.

- O primeiro atributo é o desvio padrão do valor absoluto da componente não-linear da fase instantânea, cuja equação é [2]:

$$\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left[\sum_{A_n(n) > A_t} \Phi_{NL}^2(n) \right] - \left[\frac{1}{N_c} \sum_{A_n(n) > A_t} |\Phi_{NL}(n)| \right]^2} \quad (2)$$

Onde Φ_{NL} é a componente não-linear e N_c é o número de amostras onde $A_n(n) > A_t$.

- O segundo atributo é similar ao primeiro, calcula-se o desvio padrão do valor direto da componente não-linear da fase instantânea [2]:

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left[\sum_{A_n(n) > A_t} \Phi_{NL}^2(n) \right] - \left[\frac{1}{N_c} \sum_{A_n(n) > A_t} \Phi_{NL}(n) \right]^2} \quad (3)$$

- O terceiro atributo leva em consideração o desvio padrão do valor absoluto da componente não-linear da frequência instantânea [2]:

$$\sigma_{af} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left[\sum_{A_n(n) > A_t} f_N^2(n) \right] - \left[\frac{1}{N_c} \sum_{A_n(n) > A_t} |f_N(n)| \right]^2} \quad (4)$$

Em que f_N corresponde ao valor da frequência instantânea.

- O quarto atributo calcula o desvio padrão do valor direto da componente não-linear da frequência instantânea:

$$\sigma_{df} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left[\sum_{A_n(n) > A_t} f_N^2(n) \right] - \left[\frac{1}{N_c} \sum_{A_n(n) > A_t} f_N(n) \right]^2} \quad (5)$$

- O quinto atributo analisado diz respeito à curtose da amplitude instantânea normalizada e centralizada é dada por [2]:

$$\mu_{42}^a = \frac{E\{A_{cn}^4[n]\}}{\{E\{A_{cn}^2[n]\}\}^2} \quad (6)$$

- O sexto atributo corresponde ao valor máximo da densidade espectral de potência do sinal recebido, normalizado e centralizado [2]:

$$\gamma = \frac{\max|FFT(A_{cn})|^2}{N} \quad (7)$$

Em que N é o número de amostras e FFT é a Transformada Rápida de Fourier.

- A sétima característica analisada compreende a média da amplitude instantânea normalizada e centralizada, elevada ao quadrado [5]:

$$\mu_{aa} = E \left[\left(\frac{A(n) - E(A(n))}{E(A(n))} \right)^2 \right] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_{cn}^2 \quad (8)$$

- O oitavo atributo relaciona-se ao desvio padrão da amplitude normalizada e centralizada do sinal [2]:

$$\sigma_{aa} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N A_{cn}^2(n) \right] - \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |A_{cn}(n)| \right]^2} \quad (9)$$

- Por fim, o nono atributo analisa o desvio padrão do valor absoluto da amplitude normalizada e centralizada do sinal [2]:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left[\sum_{A_n(n) > A_t} A_{cn}^2(n) \right] - \left[\frac{1}{N_c} \sum_{A_n(n) > A_t} A_{cn}(n) \right]^2} \quad (10)$$

III. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS ATRIBUTOS

A análise do comportamento de cada um dos atributos descritos anteriormente objetiva entender como cada um pode contribuir para a construção de um sistema que seja capaz, futuramente, de classificar corretamente a modulação empregada na transmissão do sinal. Desta forma, foram consideradas cinco modulações distintas, sendo elas: QAM4, QAM16, PSK2 (BPSK), FSK2 e FSK4. A escolha delas baseia-se na possibilidade de averiguação do comportamento dos atributos em modulações de amplitude, fase e frequência, além de serem adotadas em grande parte dos trabalhos que fazem uma análise semelhante [1][4][5]. Adicionalmente, uma vez que a transmissão de sinais, tanto cabeada, bem como sem fio está propensa a ruídos, faz-se necessário aplicar um modelo que seja capaz de simular esta distorção e tornar a verificação dos atributos mais próximo do real. Em vista disso, o Ruído Aditivo Branco Gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* – AWGN) é utilizado, dada a sua popularidade dentre os problemas que envolvem algum tipo de processamento de sinal [2]. A geração dos sinais e do ruído utiliza o *software* matemático Matlab® e a sua *Communication Toolbox*, onde são configurados os seguintes parâmetros, baseados em diferentes análises em que estes valores foram variados até que se pudesse visualizar de maneira clara o comportamento das modulações, além da sua presença em trabalhos semelhantes [1][3-5]: quantidade de *frames* (arbitrário): 200; tamanho de cada frame (preferencialmente em potência de 2 para a aplicação da FFT): 2048 símbolos; taxa de símbolo: 1 Hz; fator de *oversampling*: 8; são utilizados diferentes valores de *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) para análise da influência do ruído (dB): [-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15]; fase inicial aleatória: $-\pi < \phi < \pi$; filtro de forma utilizado: cosseno elevado.

Definidos os parâmetros de análise, verificou-se o comportamento dos atributos para os diferentes valores de SNR, resultando nos gráficos de resposta (Fig. 1 a 9)

cuas curvas mostram as médias obtidas de todos os frames e três vezes seu desvio padrão.

Os resultados apresentados nas figuras 1,2,3,4,8 e 9 explicitam o comportamento do desvio padrão do sinal em processamento, em que os valores absolutos e os valores diretos de fase, frequência e amplitude foram utilizados para a realização dos cálculos. Já na figura 5, a curtose da amplitude instantânea normalizada e centralizada é apresentada, onde destaca-se o distinto comportamento do parâmetro para as diferentes modulações para relações de SNR de até -10dB. A figura 6, caracterizada pelo valor máximo da densidade espectral de potência do sinal normalizado e centralizado, apresenta bons valores para serem utilizados na classificação, principalmente quando se trata da diferenciação de QAM4, QAM16 e PSK2 (BPSK) acima de -5dB de SNR. Por fim, a média da amplitude normalizada e centralizada, apresentada na figura 7, também deixa clara a possibilidade de utilização deste parâmetro para diferenciação das modulações, principalmente a partir de -5dB de SNR.

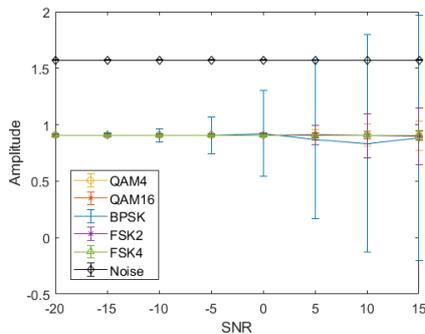


Fig. 1 – Desvio padrão do valor absoluto da componente não-linear da fase instantânea

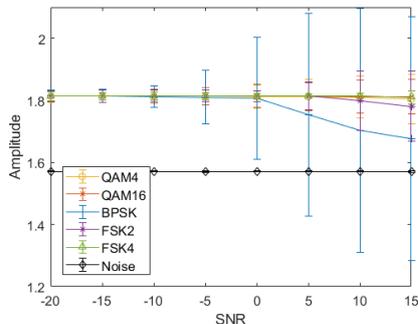


Fig. 2 – Desvio padrão do valor direto da componente não-linear da fase instantânea

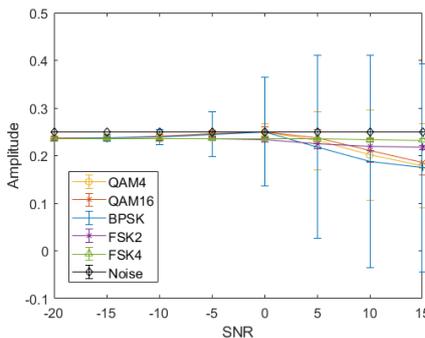


Fig. 3 – Desvio padrão do valor absoluto da componente não-linear da frequência instantânea

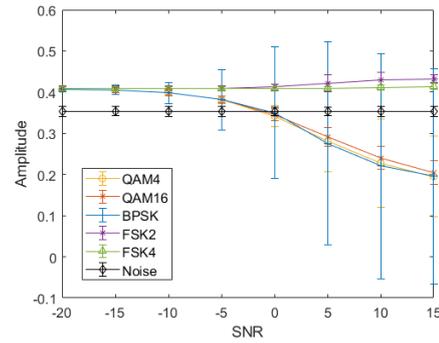


Fig. 4 – Desvio padrão do valor direto da componente não-linear da frequência instantânea

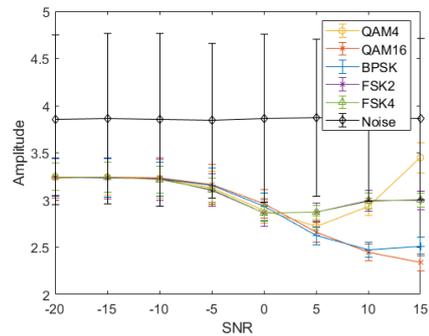


Fig. 5 – Curtose da amplitude instantânea normalizada e centralizada

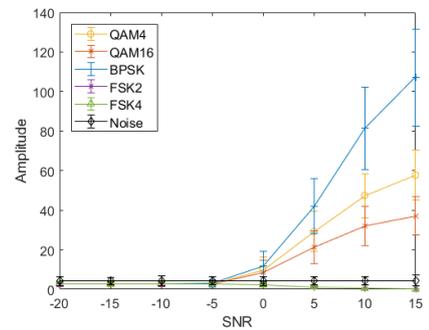


Fig. 6 – Valor máximo da densidade espectral de potência do sinal recebido, normalizado e centralizado

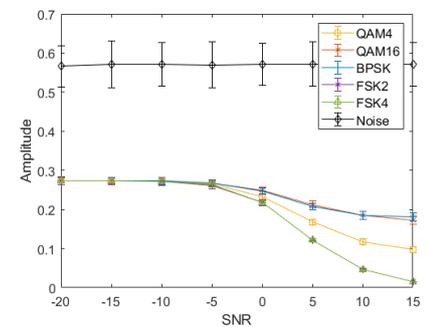


Fig. 7 - Média da amplitude instantânea normalizada e centralizada, elevada ao quadrado

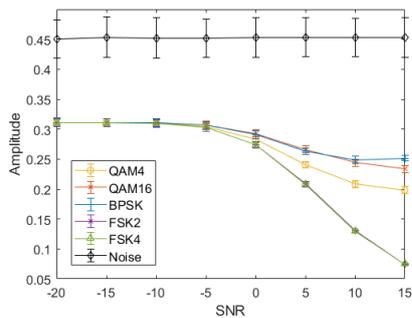


Fig. 8 - Desvio padrão da amplitude normalizada e centralizada

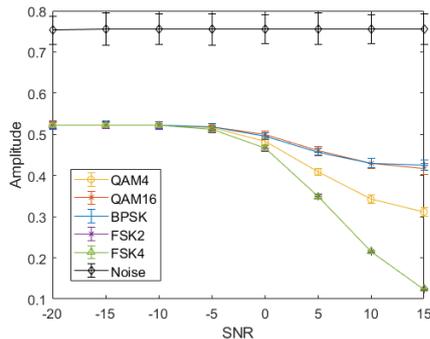


Fig. 9 - Desvio padrão do valor absoluto da amplitude normalizada e centralizada

A análise do desempenho destes atributos diante da presença de diferentes ruídos de canal permite avaliar sua dispersão, dado o comportamento do desvio padrão das amostras, além da distribuição de energia ao longo do espectro dos diferentes sinais, bem como o comportamento médio de determinados parâmetros. A partir disso, nas medidas, observa-se que com um SNR a partir de 0dB, as modulações apresentam valores que possibilitam a diferenciação das diferentes modulações utilizadas para teste. Ainda, para relações de SNR entre 0dB e -10dB, algumas grandezas, como a curtose e o desvio padrão da componente não linear da frequência instantânea, permitem, em uma primeira análise, que seja feita a diferenciação dos sinais, dada a combinação destas características em que o contraste das modulações é mais evidente. Desta forma, dado que as características de cada modulação apresentam comportamentos distintos, elas podem ser utilizadas para que a modulação utilizada na transmissão do sinal analisado seja estimada com um alto grau de confiabilidade. Evidentemente, a exploração destes dados não será realizada manualmente, mas sim com o auxílio de alguma técnica para investigação do comportamento de grandes volumes de dados e seus padrões, como algoritmos inteligentes. Neste momento, procurou-se entender o comportamento destes atributos em diferentes ambientes simulados e como eles podem ser úteis para a construção de um sistema completo, que seja capaz de receber o sinal, classificá-lo com o maior nível de confiança possível e entregá-lo para as etapas seguinte de recepção, como a demodulação e processamento das informações.

IV. CONCLUSÃO

A construção de um sistema de classificação automática de modulação que seja eficiente, tanto em termos de precisão, assim como de performance, deve levar em consideração uma série de parâmetros, dadas as diferentes maneiras de realizar esta classificação. Desta forma, a partir da investigação de diferentes atributos de um sinal e o seu comportamento para uma grande quantidade de amostras, em diferentes modulações e condições de canal de transmissão foi examinada. A partir da averiguação do seu comportamento, verificou-se a possibilidade da utilização destas características até certos limiares de ruído e, ainda, a viabilidade de combinação destas propriedades entre si para a melhora do seu desempenho em situações em que a análise isolada poderia resultar em grandes erros. Por fim, os resultados aqui apresentados serão utilizados para a construção de um sistema que, a partir do emprego de algoritmos inteligentes, fará a otimização dos dados de entrada e em maior quantidade, de tal modo que possa aumentar a capacidade de classificação e o desempenho dos atributos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Hazza, M. Shoaib, S. A. Alshebeili, e A. Fahad, "An overview of feature-based methods for digital modulation classification", in *2013 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, 2013, p. 1–6.
- [2] Z. Zhu e A. K. Nandi, *Automatic Modulation Classification: Principles, Algorithms and Applications*. 2015.
- [3] A. K. Nandi e E. E. Azzouz, "Modulation recognition using artificial neural networks", *Signal Processing*, vol. 56, nº 2, p. 165–175, jan. 1997.
- [4] A. K. Nandi e E. E. Azzouz, "Algorithms for automatic modulation recognition of communication signals", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, nº 4, p. 431–436, abr. 1998.
- [5] B. I. Dahap e Liao HongShu, "Advanced algorithm for automatic modulation recognition for analogue & digital signals", in *2015 International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE)*, 2015, p. 32–36.