

Aquisição paralela de frequência em sinais de satélites de baixa órbita baseada em correntropia

Hugo Rafael Gonçalves Cavalcante¹
Luiz Felipe de Queiroz Silveira¹
Samuel Xavier de Souza¹
Aluisio Igor Rêgo Fontes²
José Marcelo Lima Duarte³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Caixa Postal 1524 – 59078-970 – Natal – RN, Brasil
hugorafaelgc@gmail.com, {lfelipe,samuel}@dca.ufrn.br

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN
BR 405 – 59900-000 – Pau dos Ferros – RN, Brasil
aluisio.igor@gmail.com

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (CRN)
Caixa Postal 59076-740 - Natal - RN, Brasil
jmarcelo@crn.inpe.br

Abstract. Low-earth orbit (LEO) satellites move at very high speeds and can circumscribe the planet several times in a single day. These high dynamics environments induce considerable Doppler shift and Doppler rate values in the spatial communications signals, which is known as dynamic Doppler shift. Establishing communication with these systems is a multi-task process and, due to the dynamic Doppler shift, a critical task is the fine acquisition of the carrier frequency. Several studies have investigated frequency estimation techniques of satellite signals, considering communication environments characterized by additive white Gaussian noise (AWGN). However, the effects of impulsive noise should also be considered in a more accurate characterization of the LEO satellite communication scenario. This work introduces a new method of frequency acquisition for low-orbit satellites based on a parallel search guided by correntropy coefficients. Due to some of its properties, correntropy is very efficient in the processing of non-Gaussian signals, especially in impulsive noise environments. We investigate the robustness of the technique proposed in this work on a communication environment characterized by impulsive noise, and compare its performance with that obtained by a classical approach, based on the correlation coefficient. In addition, the proposed method uses parallel computing to reduce processing time and increase its energy efficiency. The carrier frequency acquisition method for LEO satellites proposed in this work can be used in the development of a decoder for signals from the Brazilian Environmental Data Collection System (SBCDA) and ARGOS.

Keywords: aerospace communications, frequency estimation, correntropy, comunicações espaciais, estimação de frequência, correntropia

1. Introdução

Satélites de baixa órbita (*Low-Earth Orbit* – LEO) tem ganhado cada vez mais destaque nos últimos anos pela popularização dos nanossatélites, os quais permitem resolver problemas específicos de maneira mais simples, e que em sua grande maioria são lançados em LEO devido ao menor custo de lançamento, curtos atrasos de transmissão e menores requisitos de potência, conforme descrito por Nunes e Leitão (2002). Os satélites LEO varrem grandes áreas do globo terrestre e circunscrevem o planeta em torno de 14 vezes em um mesmo dia. Segundo Vatalaro et al. (1995), oferecer serviços de cobertura global a partir de uma constelação de

satélites similares é uma importante vantagem dessa tecnologia, o que permite aplicações em sensoriamento remoto, em telecomunicações e na coleta de dados ambientais como no Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (SBCD) e ARGOS – sistema franco-americano.

Um dos grandes desafios no estabelecimento de comunicação com esses satélites está na determinação e o tratamento das variações de frequência, causadas pelo efeito Doppler induzido sobre a portadora do sinal transmitido. Isso significa que há um desvio entre a frequência transmitida e a recebida à bordo do satélite. Além disso, devido ao ângulo de visada entre as antenas transmissora e receptora, quando a velocidade relativa entre transmissor e receptor varia rapidamente, nota-se também uma variação da frequência ao longo do tempo, caracterizada por Zhang, Cheng e Zhang (2016) como um deslocamento Doppler dinâmico, e denominada aceleração Doppler. Em especial ao caso do SBCD, em que Rae (2005) destaca uma aceleração Doppler máxima de ± 100 Hz/s, esse desvio pode alcançar valores de até 112,8 Hz durante a janela de transmissão. Esse efeito, conseqüente da atuação da força gravitacional, da rotação da Terra e da dinâmica entre transmissor e receptor, degrada o processo de estimação de frequência e fase pelo decodificador do sinal, se não for corretamente tratado. Porém, uma vez estimados, é possível calcular a posição geográfica do objeto transmissor com base em seus valores.

Diversos métodos têm sido propostos para se superar os efeitos do deslocamento Doppler dinâmico ao longo do anos, desde soluções clássicas dadas por Tretter (1985), Kay (1989) e Fitz (1994), até mais modernas como as descritas por Su e Wu (1997), Kandeepan e Reisenfeld (2004) e Sun, Yu e Duan (2015). Porém, nenhum desses trabalhos consideram a presença de ruído impulsivo, conforme descrição de Button, Gardiner e Glover (2002) para as comunicações aeroespaciais. O ruído impulsivo, geralmente produzido pelo homem, tem uma importante contribuição no ruído externo, e seus efeitos devem ser considerados para uma caracterização mais fiel do cenário de comunicação dos satélites LEO.

Nesse trabalho é proposto um método para estimação dos desvios Doppler de até segunda ordem em uma onda portadora senoidal utilizada em um cenário de comunicação estabelecida através de satélites de baixa órbita. Em particular, constata-se que através de uma análise baseada em uma medida de similaridade estatística, denominada coeficiente de correntropia, é possível lidar eficientemente com esse problema de estimação, mesmo em um cenário de intenso ruído impulsivo. Além disso, verifica-se que a abordagem proposta é extremamente paralelizável, o que pode viabilizar uma implementação eficiente em termos de consumo energético e de tempo de processamento.

O texto está organizado como segue. A Seção 2 apresenta os conceitos fundamentais relacionados ao sistema de comunicação abordado no trabalho, assim como os modelos matemáticos do sinal sob o efeito Doppler em satélites LEO e do ruído não-gaussiano presente no ambiente de comunicação considerado. Na Seção 3 são abordados os conceitos que fundamentam a correntropia, uma medida estatística particularmente eficiente no processamento de sinais não gaussianos. Na Seção 4 são apresentados os experimentos realizados e uma análise dos resultados obtidos.

2. Modelo do Sistema

De forma geral, podemos modelar os sinais recebidos através de um enlace de comunicações via satélite por

$$z(k) = A_k \cdot \sin \left(\theta + \frac{\omega}{f_s} k + \frac{\dot{\omega}}{2f_s^2} k^2 \right) + n(k) \quad (1)$$

em que a fase da portadora é expressa por uma expansão em série de Taylor de segunda ordem, e $n(k)$ é uma sequência de amostras independentes de ruído gaussiano complexo com média

nula e variância σ^2 . Os parâmetros A_k e θ representam a amplitude e a fase inicial do sinal de interesse, respectivamente. O parâmetro ω (rad/s), por sua vez, é a constante que expressa o deslocamento na frequência da portadora (deslocamento Doppler), $\dot{\omega}$ (rad/s^2) é a constante da taxa de variação da frequência da portadora (aceleração Doppler) e f_s (amostras/s) é a frequência de amostragem do sinal.

Su e Wu (2000) verificou graficamente o comportamento de ω e $\dot{\omega}$ em um enlace com portadora a 1.5 GHz, transmitida entre um satélite LEO a 350 km de altitude e sua estação base. Esse experimento permitiu concluir que os termos de mais alta ordem na expansão da fase da portadora em série de Taylor são de menor relevância quando comparados ao termo de segunda ordem, o que podemos extrapolar também para o caso do SBCD.

A partir da Equação (1) pode-se verificar que o canal de comunicação está sendo modelado de forma simplificada apenas por um ruído AWGN. De fato, esse modelo de canal é largamente utilizado nos trabalhos relacionados na literatura. Porém, para uma caracterização mais precisa dos enlaces de comunicações por satélites deve-se incluir no modelo do canal o ruído impulsivo, conforme descrito por Button, Gardiner e Glover (2002). Button realizou medições para avaliar o impacto do ruído impulsivo presente nos sistemas comerciais de comunicações por satélite, baseado no modelo de ruído não-inteligente de classe B, descrito em detalhes por Middleton (1999). Middleton, por sua vez, afirmou que a função de densidade de probabilidade (FDP) do ruído de classe B isolado pode ser usualmente aproximado pelo modelo de distribuição α -estável simétrico (S α S), onde α é chamado de parâmetro de propagação de densidade espacial.

Weron e Weron (1995) propuseram o uso de um método clássico para geração de uma variável aleatória com distribuição α -estável simétrica para $\alpha \in \{0, 2\}$, dado por

$$X(k, \alpha) = \frac{\sin(\alpha V(k))}{(\cos(V(k)))^{1/\alpha}} \times \left(\frac{\cos(V(k) - \alpha V(k))}{W(k)} \right)^{(1-\alpha)/\alpha} \quad (2)$$

em que $V(k)$ é uma variável aleatória uniformemente distribuída entre $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ e $W(k)$ uma variável aleatória independente com distribuição exponencial e média igual a 1.

Reescrevemos então o modelo incompleto da Equação (1), para permitir a inclusão do termo característico do ruído impulsivo como segue

$$z(k) = A_k \cdot \sin \left(\theta + \frac{\omega}{f_s} k + \frac{\dot{\omega}}{2f_s^2} k^2 \right) + n(k) + X(k, \alpha). \quad (3)$$

3. Correntropia

Informações estatísticas de segunda ordem obtidas por correlação ou através do cálculo do erro médio quadrado (*mean square error* – MSE) são provavelmente as medidas mais usadas para se quantificar a similaridade entre duas variáveis aleatórias. As soluções da engenharia que obtiveram sucesso a partir dessas medidas dependem fortemente de suposições de linearidade e comportamento gaussiano.

Segundo Liu, Pokharel e Príncipe (2007), a correntropia cruzada, normalmente referida apenas pelo termo correntropia, é uma medição de similaridade generalizada entre duas variáveis aleatórias X e Y , definida por

$$V_\sigma(X, Y) = \mathbf{E}[\kappa_\sigma(X - Y)]. \quad (4)$$

Nos problema práticos, a função de densidade de probabilidade conjunta é desconhecida e apenas um número finito de dados $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ estão disponíveis, chegando a uma equação mais usual, dada por

$$\hat{V}_{N,\sigma}(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \kappa_{\sigma}(x_i - y_i) \quad (5)$$

em que $\kappa_{\sigma}(x - x_i)$ é o *kernel* gaussiano com largura σ , dado por:

$$\kappa_{\sigma}(x - x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (6)$$

Devido as transformações não lineares produzidos pelo *kernel* gaussiano, o cálculo da correntropia cruzada não garante média zero, mesmo quando os dados de entrada estão centralizados (tenham média nula). Assim, para superar essa limitação, Principe (2010) define a correntropia cruzada centralizada, dada por

$$\hat{u}_{\sigma}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \kappa_{\sigma\sqrt{2}}(x_i - y_i) - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \kappa_{\sigma\sqrt{2}}(x_i - y_j). \quad (7)$$

Uma das alternativas para realizar a medição de similaridade em sinais com amplitudes desconhecidas, conforme o modelo adotado, é proceder como Xu et al. (2007) no cálculo do coeficiente de correntropia, dado por

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{u}_{\sigma}(X, Y)}{\sqrt{\hat{u}_{\sigma}(X, X)}\sqrt{\hat{u}_{\sigma}(Y, Y)}}. \quad (8)$$

O coeficiente de correntropia $\hat{\eta}$ pode ser considerado uma generalização do conhecido coeficiente de correlação, assumindo valores nulos nos casos em que as variáveis aleatórias X e Y sejam estatisticamente independentes e módulo unitário caso exista similaridade. Isso porque, como provado por Santamaría, Pokharel e Principe (2006), a correntropia pode ser vista como um somatório de todos os momentos pares das variáveis aleatórias, conforme expresso por

$$v_{\sigma}(X, Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2^k \sigma^{2k} k} E[(X - Y)^{2k}]. \quad (9)$$

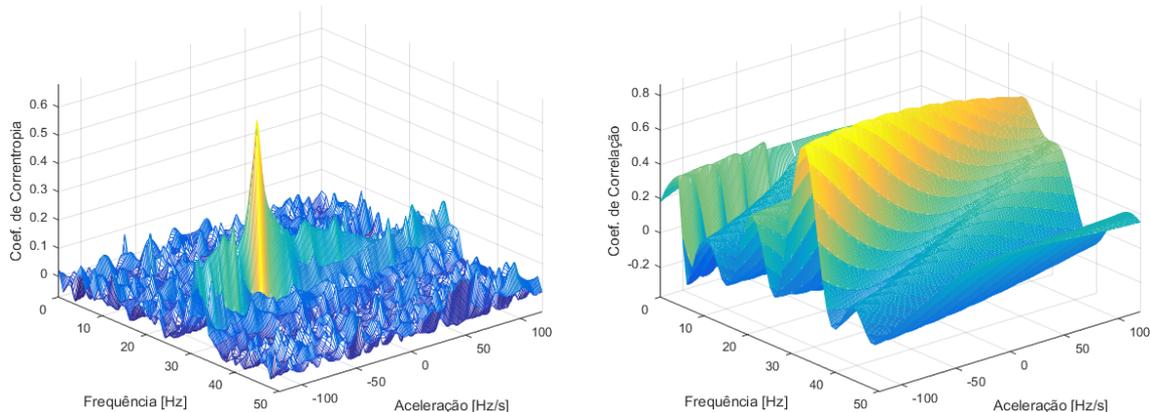
Essa característica pode ser usada para aprimorar a performance em problemas não-gaussianos e não-lineares e, por isso, é particularmente interessante para tratar o problema discutido neste trabalho. Além disso, o efeito do ruído impulsivo é amenizado pelo uso do *kernel* gaussiano no cálculo da correntropia. A diferença ao quadrado entre o sinal original e o *outlier* é realizado no expoente de uma exponencial negativa, em que seu valor máximo é $1/\sqrt{2\pi\sigma^2}$

4. Experimentos e Resultados

Os experimentos efetuados neste trabalho se propõem a duas finalidades. Primeiramente, demonstrar o desempenho da correntropia na estimação da portadora em enlaces de satélites em relação ao desempenho de alguns dos métodos atuais, que se baseiam na correlação e desconsideram os efeitos dos ruídos impulsivos existentes. Em segundo plano, possibilitar o desenvolvimento de um método com processamento paralelizável e com alta eficiência energética. Extensivas simulações foram realizadas para demonstrar a robustez da técnica nos casos descritos abaixo.

4.1. Arquitetura do estimador

O estimador proposto neste trabalho é uma técnica de estimação fina, e que deve ser precedida da detecção, isolamento e filtragem do sinal de interesse nos casos em que haja simultânea recepção de dados, como no SBCD. O método está baseado numa busca por similaridade em uma superfície, como se vê na Figura 1(a), que abrange a extensa gama de frequências residuais Doppler e da aceleração Doppler que o sinal recebido pode assumir. A formação dessa região é feita através do cálculo do coeficiente de correntropia entre o sinal de interesse e todos os que compõe uma base de dados, gerada no receptor para esse fim.



(a) Superfície de similaridade na vizinhança através coeficiente de correntropia.

(b) Superfície de similaridade na vizinhança através coeficiente de correlação.

Figura 1: Cenário de buscas de um sinal alvo com desvio Doppler de 30 Hz e Aceleração Doppler de -60 Hz/s imerso em ruído impulsivo ($GSNR = 30\text{dB}$, $\alpha = 0.8$ e $kernel \sigma = 10^{-2}$).

É importante definir as medições da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) usada nos experimentos. Uma vez que a potência de ruído não é definido claramente para distribuições α -estáveis, a definição convencional de SNR não pode usada. Tsakalides e Nikias (1995) sugere duas definições alternativas, e uma delas é a GSNR (*Generalized-SNR*). A equação definida por Tsakalides para GSNR, que lida com expressões complexas, sofreu modificações para atender o caso dos sinais reais, sendo definida por

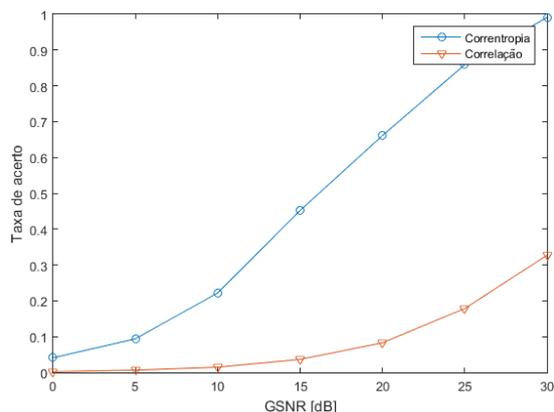
$$GSNR = 10 \log \left(\frac{1}{2\gamma^2 M} \sum_{k=1}^M |z(k)|^2 \right) \quad (10)$$

em que γ é a dispersão do sinal, o qual é um número real e positivo.

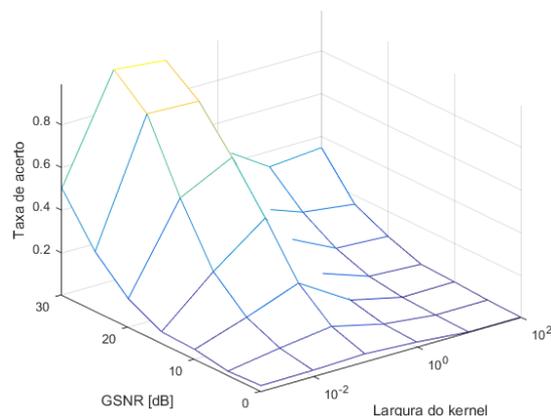
O mesmo cenário, quando construído com o coeficiente de correlação, como visto na Figura 1(b), apresenta características muito diferentes. Enquanto o coeficiente de correntropia destaca claramente um máximo sobre a frequência e aceleração Doppler de interesse, é uma tarefa árdua determiná-los precisamente com a análise do coeficiente de correlação.

4.2. Resultados alcançados

Enquanto que o desempenho da correlação diminuiu fortemente com o aumento da característica impulsiva do canal de comunicação, a correntropia se mostrou mais robusta ao ruído impulsivo, como pode ser visto na comparação das curvas da Figura 2(a). É claro o ganho de desempenho da correntropia nesse cenário. A taxa de acerto corresponde a porcentagem do número de estimações corretas em 1000 simulações, com erro máximo admitido de $\pm 12 \text{ rad/s}^2$, $\pm 12 \text{ rad/s}$ e $\pm 0.1 \text{ rad}$, para aceleração, frequência e fase inicial, respectivamente.



(a) Desempenho da Correntropia versus a Correlação.



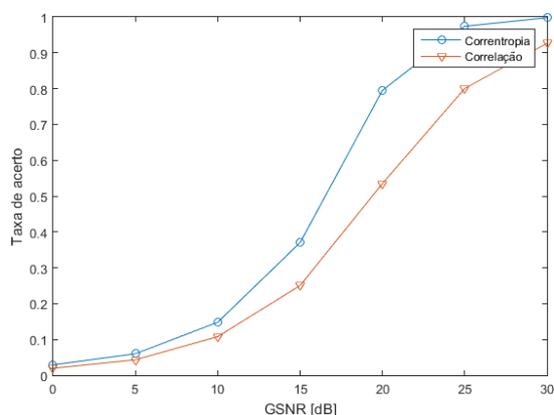
(b) Avaliação da variação da largura do kernel na função de Correntropia.

Figura 2: Cenário de intenso ruído impulsivo com distribuição α -estável ($\alpha = 0.8$).

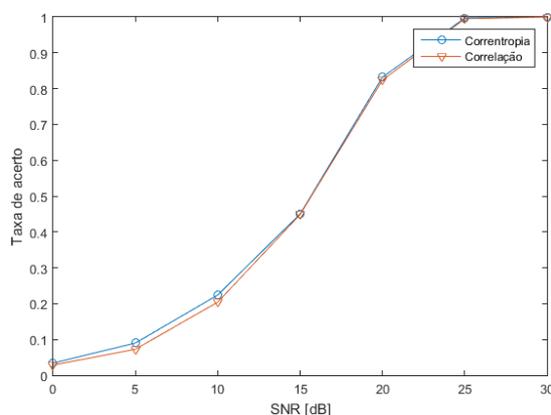
Um dos desafios do uso da correntropia é a determinação da largura do *kernel* gaussiano ótimo para cada caso. Trata-se de um parâmetro livre. Com o único intuito de encontrar o melhor ajuste da largura do *kernel*, e assim melhorar o desempenho da arquitetura proposta, as simulações foram repetidas para variadas larguras de *kernel*, afim de garantir sempre o de melhor desempenho. A Figura2(b) mostra a taxa de acerto das diversas larguras de *kernel* testadas e destaca que há um valor ótimo para o caso.

Tabela 1: Largura do *kernel* gaussiano (σ) adotado nos experimento para os diferentes GSNR.

| GSNR [dB] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|-----------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| α | Largura do <i>kernel</i> | | | | | | |
| 0.8 | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-2} | 10^{-2} |
| 1.5 | 10^2 | 1 | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-1} | 10^{-1} |
| 2.0 | 10^2 | 1 | 10^2 | 1 | 1 | 1 | 1 |



(a) Cenário de intenso ruído impulsivo com distribuição α -estável ($\alpha = 1.5$).



(b) Cenário de ruído AWGN, modelado pela distribuição α -estável ($\alpha = 2$).

Figura 3: Desempenho da correntropia versus a correlação.

Os efeitos do canal de comunicação considerado na obtenção das curvas ilustradas na Figura 3(a) apresenta características que podem ser modeladas por um ruído com distribuição

de probabilidades intermediária, entre a distribuição de Cauchy, quando $\alpha = 1$, e o ruído branco gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*, AWGN), quando $\alpha = 2$. O ganho de desempenho da correntropia anteriormente observado foi reduzido, porém ainda é destacado.

A Figura 3(b) demonstra que não há perda de desempenho da técnica para sinais imersos em ruído AWGN. Ou seja, mesmo no caso mais otimista, em que não haja ruído impulsivo algum, ainda é possível observar um desempenho que, no mínimo, equivale ao uso da correlação.

Inspirado no trabalho de Georgiou, Tsakalides e Kyriakakis (1999), foi estabelecida uma tabela de correspondência entre o GNSR e a SNR efetiva (*Effective-SNR*) para melhor caracterizar o cenário sob o qual estamos tratando o problema, como visto na Tabela 2.

Tabela 2: Correspondência entre GNSR e *Effective-SNR* abordados nos experimentos.

| GNSR [dB] | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|-----------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| α | <i>Effective-SNR</i> [dB] | | | | | | |
| 0.8 | -67.8472 | -62.1541 | -57.0985 | -52.5358 | -47.0814 | -42.7992 | -37.2379 |
| 1.5 | -14.3434 | -9.5565 | -4.4071 | 0.4968 | 5.4799 | 10.4848 | 15.2198 |
| 2.0 | -0.0005 | 4.9992 | 10.0017 | 14.9993 | 20.0001 | 24.9991 | 30.0006 |

5. Conclusões

O método proposto apresentou robustez na estimativa de deslocamento e aceleração Doppler em ambientes de comunicação com intenso ruído impulsivo, sendo mantido o desempenho de arquiteturas baseadas em correlação em canais caracterizados apenas pelo ruído AWGN. Os experimentos apontaram os benefícios da correntropia, numa comparação de eficiência com a correlação, já que muitos estudos na literatura se baseiam nessa medida, como o apresentado por Zhang (2015). Foi constatado, porém, que a correntropia apresenta maior complexidade computacional que a correlação, e portanto, na continuação desse trabalho será investigada a viabilidade de uma implementação dessa arquitetura em sistemas com restrições de consumo e processamento. Contudo, estudos preliminares já indicam que o método proposto é altamente paralelizável, o que irá viabilizar o desenvolvimento de uma arquitetura paralela de processamento, agregando assim, melhorias no seu desempenho e uma redução em seu consumo energético.

6. Agradecimentos

Presto os devidos agradecimentos a Capes pelo financiamento dos estudos de pós-graduação e a todos que contribuíram na realização deste trabalho.

Referências

- BUTTON, M. D.; GARDINER, J. G.; GLOVER, I. A. Measurement of the impulsive noise environment for satellite-mobile radio systems at 1.5 ghz. *IEEE Transactions on vehicular technology*, IEEE, v. 51, n. 3, p. 551–560, 2002.
- FITZ, M. P. Further results in the fast estimation of a single frequency. *IEEE Transactions on Communications*, v. 42, p. 862–864, 1994.
- GEORGIU, P. G.; TSAKALIDES, P.; KYRIAKAKIS, C. Alpha-stable modeling of noise and robust time-delay estimation in the presence of impulsive noise. *IEEE transactions on multimedia*, IEEE, v. 1, n. 3, p. 291–301, 1999.
- KANDEEPAN, S.; REISENFELD, S. Fast doppler tracking dsp-based earth station modem for leo satellite applications. In: IEEE. *Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2004. ISPACS 2004. Proceedings of 2004 International Symposium on*. [S.l.], 2004. p. 332–337.

- KAY, S. A fast and accurate single frequency estimator. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE, v. 37, n. 12, p. 1987–1990, 1989.
- LIU, W.; POKHAREL, P. P.; PRÍNCIPE, J. C. Correntropy: properties and applications in non-gaussian signal processing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 55, n. 11, p. 5286–5298, 2007.
- MIDDLETON, D. Non-gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class a and class b noise models. *IEEE Transactions on Information Theory*, IEEE, v. 45, n. 4, p. 1129–1149, 1999.
- NUNES, F. D.; LEITÃO, J. M. Joint doppler frequency and frequency-rate estimation in leo satellite communications. In: IEEE. *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM'02. IEEE*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 2870–2874.
- PRINCIPE, J. C. *Information theoretic learning: Renyi's entropy and kernel perspectives*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
- RAE, J. P. *Detector de Sinais para os Satélites do SBCD usando Análise Espectral Digital*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Tese de Mestrado)—Instituto Técnico da Aeronautica, São José dos Campos, 2005.
- SANTAMARÍA, I.; POKHAREL, P. P.; PRINCIPE, J. C. Generalized correlation function: definition, properties, and application to blind equalization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, IEEE, v. 54, n. 6, p. 2187–2197, 2006.
- SU, Y. T.; WU, R.-C. Frequency acquisition and tracking for mobile leo satellite communications. In: IEEE. *Vehicular Technology Conference, 1997, IEEE 47th*. [S.l.], 1997. v. 3, p. 1738–1742.
- SU, Y. T.; WU, R.-C. Frequency acquisition and tracking in high dynamic environments. *IEEE transactions on vehicular technology*, IEEE, v. 49, n. 6, p. 2419–2429, 2000.
- SUN, J.; YU, Z.; DUAN, X. Simplified diagonal cross-correlation frequency estimation based on phase un-wrapping. In: IEEE. *Communications and Networking in China (ChinaCom), 2015 10th International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 739–744.
- TRETTNER, S. Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression (corresp.). *IEEE Transactions on Information theory*, IEEE, v. 31, n. 6, p. 832–835, 1985.
- TSAKALIDES, P.; NIKIAS, C. L. Maximum likelihood localization of sources in noise modeled as a stable process. *IEEE Transactions on Signal Processing*, IEEE, v. 43, n. 11, p. 2700–2713, 1995.
- VATALARO, F. et al. Analysis of leo, meo, and geo global mobile satellite systems in the presence of interference and fading. *IEEE Journal on selected areas in communications*, IEEE, v. 13, n. 2, p. 291–300, 1995.
- WERON, A.; WERON, R. Computer simulation of lévy α -stable variables and processes. In: *Chaos—The Interplay Between Stochastic and Deterministic Behaviour*. [S.l.]: Springer, 1995. p. 379–392.
- XU, J.-W. et al. A new nonlinear similarity measure for multichannel biological signals. In: IEEE. *2007 International joint conference on neural networks*. [S.l.], 2007. p. 2046–2051.
- ZHANG, W.-Q. Fast doppler rate estimation based on fourth-order moment spectrum. *Electronics Letters, IET*, v. 51, n. 23, p. 1926–1928, 2015.
- ZHANG, Z.; CHENG, W.; ZHANG, H. Search-range-correction-based doppler shift acquisition for space communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 65, n. 5, p. 3271–3284, 2016.