

Extensão do Algoritmo *Set-Membership-CM* para o Contexto de Redes de Sensores Sem Fio

Fábio F. de Assis e Aline Neves

Resumo— O objetivo deste artigo é estudar o problema de filtragem adaptativa e apresentar solução para reduzir a interferência intersimbólica (IIS) na equalização de sinais, no contexto de redes de sensores sem fio, operando no modo difusão. Para isso, estendemos o critério de equalização cega *Set-membership* do Módulo Constante (SM-CM) [1] para o contexto de redes de sensores sem fio no modo difusão. O novo algoritmo é denominado Algoritmo *Set-membership* CMA no modo Difusão SG (SM-CMAD-SG). Com isso a rede consegue economizar na troca de informações entre os nós, reduzindo processamento e consumo de energia. Comparamos este algoritmo com o algoritmo *Set-membership* CMA no modo Difusão (SM-CMAD) proposto em [2]. Ainda que os dois apresentem desempenhos semelhantes em termos de redução da IIS, o novo algoritmo possui desempenho médio 50% superior ao SM-CMAD em termos de economia de energia.

Palavras-Chave—Filtragem Adaptativa Autodidata, Algoritmo SM-CMAD-SG, Redes de Sensores Sem Fio.

Abstract— The objective of this paper is to study the adaptive filtering problem and present a solution to reduce intersymbol interference (IIS) in signal equalization, in the context of wireless sensor networks, operating in diffusion mode. For this, we extend the blind-equalization criterion Constant Modulus Set-membership (SM-CM) [1] for the context of wireless sensor networks in diffusion mode. The proposed algorithm is called Diffusion Mode Constant Modulus Algorithm SG (SM-CMAD-SG). Thus, the network can save on the exchange of information between the nodes, reducing processing and power consumption. We compared this algorithm with the Set-membership CMA algorithm in Diffusion mode (SM-CMAD) proposed in [2]. Although the two perform similarly in terms of IIS reduction, the new algorithm has an average performance 50% higher than SM-CMAD in terms of energy savings.

Keywords—Blind Adaptive Filtering, Algorithm SM-CMAD-SG, Wireless Sensor Network.

I. INTRODUÇÃO

Há crescente demanda por novas tecnologias e meios mais eficientes para transmissão de dados, em especial as tecnologias que utilizem redes de sensores sem fio. Isso abre espaço para muitos estudos com o intuito de reduzir efeitos nocivos do canal buscando também maior eficiência energética e computacional, principalmente em aplicações de tempo real e de alta criticidade. Neste cenário os equalizadores se apresentam como uma solução para redução da interferência intersimbólica sofrida durante a transmissão do sinal e também podem contribuir para melhorar a eficiência energética dos sensores da rede.

No contexto não supervisionado, também conhecido como técnicas autodidatas ou cegas, poucos trabalhos podem ser encontrados neste contexto. R. Abdolee e B. Champagne [3], foram os pioneiros neste assunto, adaptando o algoritmo do módulo constante CMA [4], para redes de sensores, mas ficando restrito ao caso de redes com topologia em anel. Em [5], a técnica do módulo constante foi estendida para redes com qualquer topologia. Essa proposta foi chamada de Algoritmo do Módulo Constante no modo Difusão (CMAD) [6]. Consideramos que todos os nós têm capacidade de processar a informação recebida e os nós vizinhos trocam informações entre si. Também foi mostrado que o desempenho do algoritmo depende da matriz de combinação que está sendo utilizada, diferentemente de algoritmos supervisionados [7].

O algoritmo *Set-membership* do Módulo Constante (SM-CM) foi proposto em um contexto cego sem cooperação [1]. Outros trabalhos também estudaram tal técnica no contexto semi-cego como [8], [9].

Estendendo para o contexto de redes de sensores, a abordagem SM-CM se mostra muito interessante, pois apresenta grande economia de energia, restringindo o número de atualizações dos pesos do equalizador. Assim pretendemos aproveitar as vantagens da técnica SM-CM [1] dentro do contexto de equalização autodidata no modo difusão. O método proposto busca ajustar os coeficientes do equalizador trocando informações somente quando a troca for interessante para o nó em questão. Desta forma, consegue-se reduzir o custo de processamento e energia. Os resultados de simulação são comparados com os obtidos pelo algoritmo CMAD proposto em [6] e pelo algoritmo SM-CMAD proposto em [2].

Na próxima seção apresentamos o modelo de rede e definições do sistema utilizado neste trabalho. Na seção III descrevemos o algoritmo CMA no modo difusão, seguido da seção IV que descreve o algoritmo *Set-membership-CM* proposto em [1]. A extensão do algoritmo, para o modo difusão é apresentada na seção V. Discutimos os resultados de simulação na seção VI. As conclusões são apresentadas na seção VII.

II. MODELO DO SISTEMA

O modelo de rede adotado opera em modo difusão com estrutura distribuída homogênea e estática baseado em [3], [5], [6]. Esse modelo de rede pode ser utilizado em diversos cenários diferentes [7] principalmente em aplicações de tempo real, como localização de objetos ou desenho topográfico de mapas aéreo, na medicina estimando ou monitorando dados fisiológicos de pessoas, na estimação de dados ambientais como chuvas, velocidade do vento, umidade dentre diversas outras aplicações.

Fábio Ferreira de Assis e Aline Neves, estão no Centro de Engenharia e Modelagem, Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André-SP, Brasil, e-mails: fabio.assis@ufabc.edu.br, aline.neves@ufabc.edu.br

Consideraremos que a topologia não varia no tempo e todos os nós têm poder de processamento local e trocam informações com seus nós vizinhos adjacentes. O objetivo é equalizar o sinal transmitido $s(i)$, sem a necessidade de transmitir um sinal de referência junto com o sinal de interesse. Neste cenário de equalização em redes de sensores, cada nó irá possuir um filtro adaptativo que é usado para reverter as distorções introduzidas por um canal de comunicação qualquer. O sistema em estudo será modelado por um filtro FIR.

Seguindo o modelo em [5], o sinal recebido por cada nó k é dado pela equação (1):

$$u_k(i) = \sum_{g=0}^{q-1} e^{j\theta_k} h_g s(i-g) + v_k(i), \quad (1)$$

onde $u_k(i)$ é o sinal recebido, h_g com $g = \{0, \dots, q-1\}$, corresponde aos coeficientes de resposta ao impulso finita do canal, $v_k(i)$ é o ruído branco e Gaussiano do k -ésimo nó. O deslocamento de fase do sinal recebido por cada nó é dado por θ_k , modelado como uma variável aleatória com distribuição uniforme independente e identicamente distribuída entre $[0, 2\pi]$, mantendo-se constante durante o processo de adaptação.

A topologia de rede utilizada como modelo neste trabalho possui 12 nós, ou seja, $N = 12$, onde N representa o número de nós da rede. Tal rede foi desenhada de modo a ter nós com muitos vizinhos e nós com poucos vizinhos adjacentes conectados entre si. Dessa forma é possível verificar as vantagens da cooperação entre os nós. A topologia da rede é mapeada nos algoritmos estudados pelo uso de matrizes de combinação. Várias regras podem ser empregadas para definir esta matriz. A matriz de combinação tem a função de informar a topologia da rede para o algoritmo, coletando a informação de como os nós estão conectados entre si. Tal matriz é de ordem $N \times N$, onde N é o número de nós da rede. A matriz deve sempre satisfazer a propriedade de que o somatório dos coeficientes referentes a cada nó seja igual a 1, ou seja, os valores de cada linha da matriz devem ter seu somatório igual a 1. Podemos representar a vizinhança do nó k simplesmente por \mathcal{N}_k . Consideramos que $n_k = |\mathcal{N}_k|$, sendo $|\mathcal{N}_k|$ a cardinalidade de \mathcal{N}_k , ou seja, é o número de elementos do conjunto \mathcal{N}_k .

Diversas técnicas permitem realizar este mapeamento: regra de Metropolis (*Metropolis Rule* - MR) [10], regra de Laplace (*Laplacian Rule* - LR) [11], [12], regra do Grau Máximo (*Maximum Degree Rule* - MD) [13], regra do Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbor Rule* - NN) [14] e regra do Grau Relativo (*Relative Degree Rule* - RD) [13].

Na próxima seção iremos descrever o algoritmo CMA no modo Difusão [6] e, em seguida, o critério *Set-membership*-CM [1]. Ambos serão combinados para apresentar uma nova solução.

III. ALGORITMO CMA NO MODO DIFUSÃO

O algoritmo CMA no modo difusão (CMAD) foi proposto inicialmente em [5] podendo operar em diversas topologias de rede. Os coeficientes do filtro adaptativo, existente em cada nó, são representados por $\boldsymbol{\psi}_k = [\psi_{k1}, \psi_{k2}, \dots, \psi_{kL}]$, ou seja, $\boldsymbol{\psi}_k$ é a estimativa local do nó k , sendo L o tamanho do filtro adaptativo. Além disso, cada nó obtém uma estimativa agregada, a partir da fusão das estimativas locais de seus vizinhos:

$$\boldsymbol{\phi}_k(i) = f_k(\boldsymbol{\psi}_l(i)) \quad l \in \mathcal{N}_k, \quad (2)$$

onde f_k é chamada de função de combinação. Neste trabalho, utilizaremos uma função linear. Portanto $\boldsymbol{\phi}_k(i)$ pode ser definido como:

$$\boldsymbol{\phi}_k(i) = \sum_{l \in \mathcal{N}_k} c_{kl} \boldsymbol{\psi}_l(i), \quad (3)$$

onde c_{kl} são os coeficientes da matriz de combinação C , que possui o mapeamento da topologia da rede.

A saída do equalizador y_k para o nó k é obtida usando-se a estimativa agregada:

$$y_k(i) = \boldsymbol{\phi}_k(i) \mathbf{u}_k^T(i), \quad (4)$$

onde $\mathbf{u}_k(i) = [u_k(i) \ u_k(i-1) \ \dots \ u_k(i-L+1)]$.

Tendo como base o critério do módulo constante, podemos definir:

$$e_k(i) = y_k(i)(R_2 - |y_k(i)|^2), \quad (5)$$

onde R_2 , é baseado nas características estatísticas do sinal de entrada, dado pela seguinte relação:

$$R_2 = \frac{E\{|s(i)|^4\}}{E\{|s(i)|^2\}} \quad (6)$$

Para finalizar, a estimativa agregada $\boldsymbol{\phi}_k(i)$ é utilizada para atualizar os pesos do equalizador do nó k . A adaptação dos coeficientes é realizada da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\psi}_k(i+1) = \boldsymbol{\phi}_k(i) + \mu e_k(i) \mathbf{u}_k^*(i), \quad (7)$$

onde μ representa o passo de adaptação do nó k e $*$ representa o conjugado.

Conforme os resultados obtidos em [6], o algoritmo CMAD apresenta como vantagem a estabilidade mesmo em situações de falhas de determinado nó da rede. Isto é possível pois os outros nós são capazes de continuar compartilhando suas informações. Porém, o desempenho da rede pode ser comprometido dependendo da topologia e do nó que falhar. Ressaltamos que, dependendo da topologia da rede, as matrizes de combinação interferem no desempenho do algoritmo do módulo constante no modo difusão (CMAD).

Na próxima seção, retomamos o algoritmo SM-CM, proposto em [1].

IV. ALGORITMO SET-MEMBERSHIP CM

O algoritmo *Set-membership* CM [1], combina o algoritmo CMA com a técnica *set-membership* o que reduz o número de atualizações do algoritmo.

Descrevemos as equações do algoritmo a seguir. A função custo é dada por:

$$J = (1 - |y|^2)^2 \quad (8)$$

No contexto *set-membership*, queremos que:

$$J(y) \leq \gamma^2, \quad (9)$$

onde γ^2 é uma constante que define o limite para o valor da função custo e que depende do cenário sendo considerado.

Sendo assim, caso (9) seja satisfeita, consideramos que uma boa solução foi atingida e não é necessário atualizar mais os coeficientes do filtro.

A partir de (8) e (9) temos que:

$$\begin{aligned} -\gamma &\leq 1 - |y|^2 \leq \gamma \\ \gamma + 1 &\geq |y|^2 \geq -\gamma + 1 \end{aligned} \quad (10)$$

Desta maneira não existe atualização quando:

$$\sqrt{1-\gamma} \leq |y| \leq \sqrt{1+\gamma}, \quad (11)$$

onde adotamos γ sempre como um valor real positivo.

Portanto, o passo de adaptação do algoritmo é definido conforme esta condição. A tabela I resume o SM-CM como proposto em [1].

TABELA I. CRITÉRIO SM-CM

Critério SM-CM	
$\mu(i) = \begin{cases} \left(\frac{\sqrt{1-\gamma}}{ y(i) } - 1 \right) \frac{y(i)}{\ u(i)\ ^2}, & y(i) < \sqrt{1-\gamma} \\ A & \\ \left(\frac{\sqrt{1+\gamma}}{ y(i) } - 1 \right) \frac{y(i)}{\ u(i)\ ^2}, & y(i) > \sqrt{1+\gamma} \\ A & \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$	

Em [1], além dos autores proporem a ideia de um algoritmo *set-membership* dado pela equação (11), os autores também desenvolvem um passo de adaptação ótimo, como mostrado na tabela 1. O valor de $\mu(i)$ é obtido a partir da relação mostrada em (11) e da equação de atualização dos pesos do equalizador que é dada por:

$$\psi(i+1) = \psi(i) + \mu(i)u(i) \quad (12)$$

Na próxima seção, apresentaremos o SM-CMAD-SG, estendendo o critério *Set-membership* CM, para o modo difusão.

V. ALGORITMO SM-CMAD-SG

Tendo revisado o SM-CM proposto em [1], podemos facilmente estendê-lo para o contexto de redes de sensores sem fio descrito nas seções II e III.

O algoritmo aqui proposto será denotado por SM-CMAD-SG, visto que o limitante de comparação da saída y é proporcional a raiz quadrada de γ . O algoritmo combina o SM-CM mostrado na tabela I com a notação definida na seção III. O resultado é mostrado na tabela II.

O algoritmo SM-CMAD-SG apresenta grande economia por não efetuar atualizações desnecessárias entre os nós da rede. Esse é um aspecto muito importante em se tratando de aplicações em redes de sensores sem fio.

Na seção VI iremos analisar o algoritmo proposto e compará-lo com uma outra versão de algoritmo *set-membership* também baseada no CMA que havia sido proposta em [2]. Tal versão será denominada SM-CMAD e consiste no algoritmo

mostrado na tabela III. A adaptação do SM-CMAD, só ocorre caso o erro $e_k(i)$ seja maior que o limiar $\bar{\gamma}$. O passo médio de adaptação $\bar{\mu}$ e as variáveis τ e m são constantes positivas. A variância do ruído no k -ésimo nó é dado por $\sigma_{\eta,k}^2$.

TABELA II. ALGORITMO SM-CMAD-SG

Algoritmo SM-CMAD-SG
$y_k(i) = \phi_k(i)u_k^T(i)$
$\phi_k(i) = \sum_{l \in N_k} c_{kl}\psi_l(i)$
se $ y_k(i) < \sqrt{1-\gamma}$,
$\mu_k(i) = \left\{ \left(\frac{\sqrt{1-\gamma}}{ y_k(i) } - 1 \right) \frac{y_k(i)}{\ u_k^T(i)\ ^2} \right.$
senão se $ y_k(i) > \sqrt{1+\gamma}$,
$\mu_k(i) = \left\{ \left(\frac{\sqrt{1+\gamma}}{ y_k(i) } - 1 \right) \frac{y_k(i)}{\ u_k^T(i)\ ^2} \right.$
senão $\mu_k(i) = 0$,
fim se
$\psi_k(i+1) = \phi_k(i) + \mu_k(i)u_k^*(i)$

TABELA III. ALGORITMO SM-CMAD

Algoritmo SM-CMAD
$y_k(i) = \phi_k(i)u_k^T(i)$
$\phi_k(i) = \sum_{l \in N_k} c_{kl}\psi_l(i)$
$e_k(i) = y_k(i)(R_2 - y_k(i) ^2)$
$\bar{\gamma}_k = (\tau\sigma_{\eta,k}^2)^m$, com $m > 0,5$
se $ e_k(i) > \bar{\gamma}_k$,
$\mu_k(i) = \bar{\mu} \left(1 - \frac{\bar{\gamma}_k}{ e_k(i) } \right)$
senão $\mu_k(i) = 0$,
fim se
$\psi_k(i+1) = \phi_k(i) + \mu_k(i)u_k^*(i)$

VI. SIMULAÇÕES DO SISTEMA

As simulações foram realizadas no seguinte contexto: o sinal de entrada tem modulação 4-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). A rede possui $N = 12$ nós. Foi considerada a média de 100 simulações. A inicialização dos coeficientes do equalizador seguiu a estratégia “*center spike*”, ou seja, $\psi_k = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]$, para $k = 1, \dots, L$, onde $L = 7$ é o tamanho do equalizador. Foram testadas todas as matrizes de combinação citadas na seção II. A medida de desempenho utilizada em todos os cenários de simulação foi a Interferência Intersimbólica média (IIS), expressa na equação (13):

$$IIS(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\sum_m |\alpha_{km}(i)|^2 - |\alpha_k(i)|_{max}^2}{|\alpha_k(i)|_{max}^2} \quad (13)$$

sendo $\alpha_k(i) = h * \phi_k(i)$, na qual o símbolo * representa a operação de convolução, h representa a resposta ao impulso do canal e ϕ_k é a estimativa agregada definida em (3).

Os parâmetros utilizados nas simulações foram escolhidos por meio de uma série de simulações, adotando-se a combinação que levou aos melhores resultados. Nestas primeiras simulações, foi utilizado o canal $h = [1 \ 0.5 \ 0.2]$, de fase mínima.

Iniciamos pela análise do desempenho do SM-CMAD-SG com relação ao parâmetro γ . Os resultados são mostrados na Fig. 1. Nesta primeira simulação, analisamos diversos valores para γ . Comparamos o desempenho em termos de IIS, velocidade de convergência e também em termos da porcentagem de economia na troca de informações entre os nós. Para o cálculo desta porcentagem, consideramos quantas vezes não existe troca de informações ($\mu_k = 0$ na tabela II) dentre as 1000 iterações consideradas nesta simulação. Por exemplo, para $\gamma = 0.2$, existe uma economia em termos de troca de informação de 92.88%, ou seja, em média, os nós só precisaram trocar informações em 7,12% das iterações consideradas.

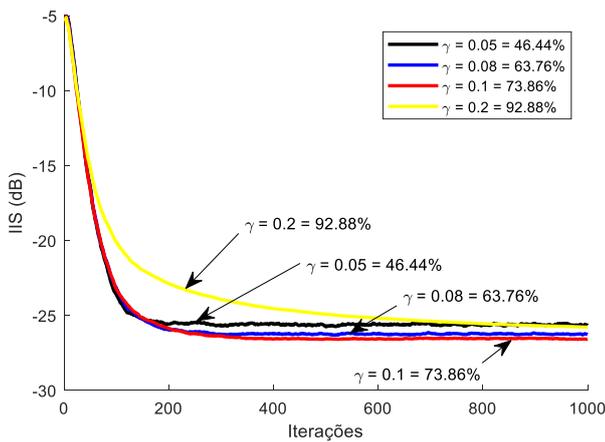


Fig. 1. SM-CMAD-SG, variação de γ , $h = [1 \ 0.5 \ 0.2]$, $SNR = 30$ dB.

Podemos ver pela Fig. 1 que valores de γ entre 0.05 e 0.1 levam o algoritmo a convergir bem, com desempenhos em termos de velocidade de convergência e patamar de IIS muito próximos. Podemos ver com esses resultados que se o valor de γ for muito pequeno o algoritmo tende a economizar menos em atualizações e se o valor de γ for muito grande tende a ficar muito lento e não convergir. Assim destacamos o valor de $\gamma = 0.1$ como resultado mais interessante, pois o algoritmo apresenta seu melhor desempenho, obtendo uma curva rápida, baixo patamar de IIS e alta economia na redução entre a troca de informações.

Na simulação da Fig. 2 utilizamos os seguintes parâmetros: $SNR = 30$ dB, $\gamma = 0.1$ e todas as matrizes de combinação.

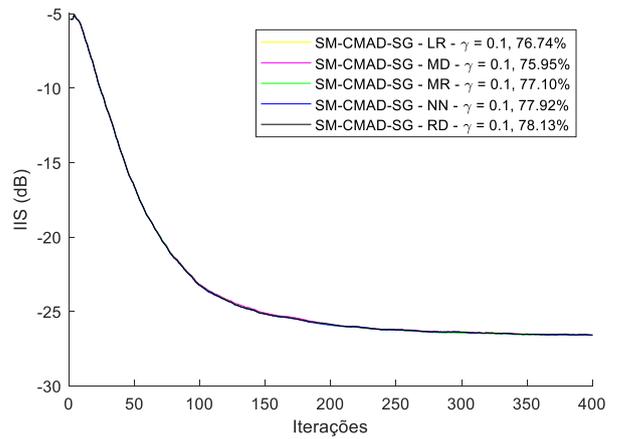


Fig. 2. SM-CMAD-SG, comparação entre as matrizes, $h = [1 \ 0.5 \ 0.2]$, $SNR = 30$ dB.

Visualizamos na Fig. 2 que, diferentemente do que acontece com o CMAD, todas as matrizes de combinação levam o algoritmo a atingir desempenhos equivalentes. Todos os casos apresentam boa velocidade de convergência, com patamar de IIS médio de aproximadamente -25 dB e uma economia em redução de atualizações média de 77,16%.

Na Fig. 3 abaixo vemos o desempenho do algoritmo para SNRs diferentes, mostrando que o algoritmo converge bem mesmo para SNRs mais baixas. Para esta simulação, utilizamos somente a matriz de combinação obtida pela regra do vizinho mais próximo (NN). Os valores de γ que utilizamos nesta simulação foram os que apresentaram o melhor desempenho para cada SNR. Utilizamos $\gamma = 0.1$ para $SNR = 30$ dB, $\gamma = 0.2$ para $SNR = 20$ dB e $\gamma = 0.6$ para $SNR = 10$ dB.

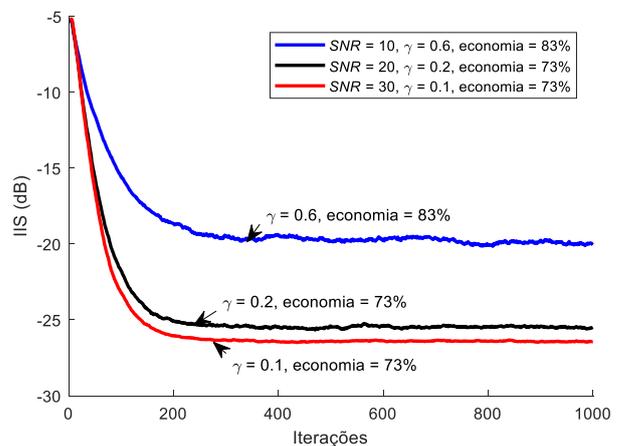


Fig. 3. SM-CMAD-SG, variação da SNR , $h = [1 \ 0.5 \ 0.2]$.

Podemos ver que entre 20 e 30 dB de SNR , temos pouca variação no patamar de IIS e nenhuma diferença na economia em redução de atualizações.

Agora vamos comparar o SM-CMAD-SG proposto aqui (Tabela II) com o SM-CMAD proposto em [2] e apresentado na Tabela III. Neste caso, utilizamos um canal de fase não mínima, $h = [0.3482 \ -0.8704 \ 0.3482]$.

Na Fig. 4 utilizamos os seguintes parâmetros: para o SM-CMAD-SG, $\gamma = 0.8$; para o SM-CMAD, $\bar{\mu} = 0.001$, com $m = 1$ e $\tau = 1$. A relação sinal ruído usada foi $SNR = 10$ dB. A matriz de combinação utilizada foi a de grau máximo (MD). Os parâmetros foram escolhidos de forma que os dois algoritmos apresentassem desempenhos semelhantes em termos de velocidade de convergência e patamar de IIS residual, para que pudéssemos comparar suas economias em termos de troca de informações.

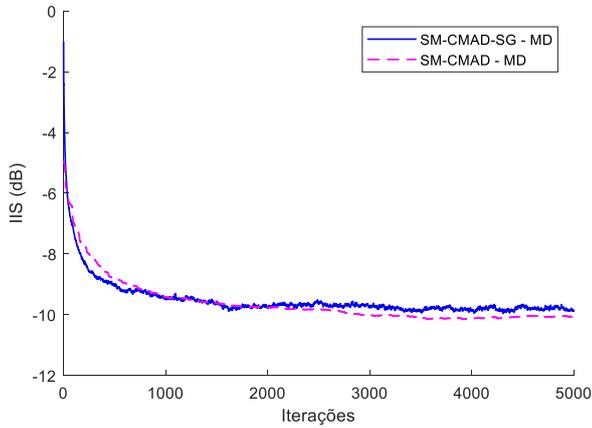


Fig. 4. SM-CMAD-SG x SM-CMAD, $h = [0.3482 \ 0.8704 \ 0.3482]$, $SNR = 30$ dB.

Na simulação da Fig. 4 vemos que o algoritmo SM-CMAD-SG obtém, uma economia em processamento muito interessante: neste caso o SM-CMAD obteve economia de 43%, enquanto o SM-CMAD-SG obteve 84% de economia o que mostra a superioridade do desempenho do segundo algoritmo.

Comparando os algoritmos, incluindo o CMAD discutido na seção III, obtemos a Fig. 5. Nesta simulação utilizamos a matriz de combinação NN e o canal $h = [1 \ 0.5 \ 0.2]$. Para o SM-CMAD, utilizamos $\bar{\mu} = 0.02$, $\tau = 3$, $m = 1$; para o SM-CMAD-SG, $\gamma = 0.2$ e para o CMAD, $\mu = 0.02$.

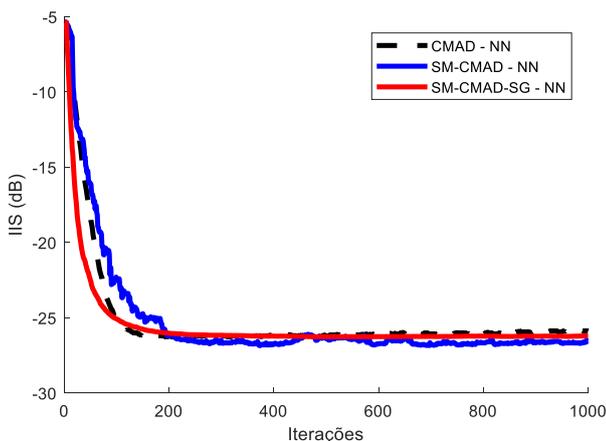


Fig. 5. SM-CMAD-SG x SM-CMAD x CMAD, $h = [1 \ 0.5 \ 0.2]$, $SNR = 30$ dB.

Podemos ver pela Fig. 5 que todos os algoritmos obtiveram desempenhos similares em termos de IIS, com o SM-CMAD-SG convergindo ligeiramente mais rápido. A economia na redução de atualizações para o SM-CMAD, foi de 54% e para

o SM-CMAD-SG foi de 93.8%. Podemos assim deduzir que este último tem desempenho muito superior aos anteriores para este cenário.

VII. CONCLUSÃO

Neste artigo estendemos o algoritmo SM-CM, proposto em [1], para o contexto de redes de sensores sem fio. Chamamos tal algoritmo de *Set-membership* CMA no modo Difusão (SM-CMAD-SG). Avaliamos o desempenho dos algoritmos em diversos cenários. Em todos o algoritmo apresentou desempenhos muito satisfatórios. Pudemos, ainda, afirmar que, para modulação 4-QAM, o SM-CMAD-SG é bem superior ao SM-CMAD em termos de economia de processamento, sendo em alguns casos aproximadamente 50% mais eficiente como o resultado apresentado na Fig. 4. Tal economia, que reduz trocas desnecessárias de informação, tem impacto direto no desempenho da rede como um todo, visto que o uso eficiente de energia é um aspecto crítico em redes de sensores sem fio.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Gollamudi, S. Nagaraj, e Y.-F. Huang, "Blind equalization with a deterministic constant modulus cost-a set-membership filtering approach", in *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.00CH37100)*, 2000, vol. 5, p. 2765–2768 vol.5.
- [2] F. F. de Assis e A. Neves, "Algoritmo Set-Membership CMA no Modo Difusão Aplicado a Redes de Sensores", in *XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBt2017*, 2017, p. 196–200.
- [3] R. Abdoe e B. Champagne, "Distributed Blind Adaptive Algorithms Based on Constant Modulus for Wireless Sensor Networks", *2010 6th Int. Conf. Wirel. Mob. Commun.*, p. 303–308, 2010.
- [4] D. N. Godard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 28, n° 11, p. 1867–1875, 1980.
- [5] S. Santos, "Estudo de algoritmos adaptativos aplicados a redes de sensores sem fio: caso supervisionado e não supervisionado", UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC, 2014.
- [6] S. Santos e A. Neves, "Diffusion Constant Modulus Algorithm for Wireless Sensor Networks", *XXXIV Simp. Bras. TELECOMUNICAC, OES - SBt2016*, n° 2, p. 704–707, 2016.
- [7] A. De Paula e C. Panazio, "Analysis of distributed parameter estimation in WSN with unreliable nodes", *Proc. Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, p. 116–120, 2012.
- [8] P. S. R. Diniz e S. Werner, "Set-Membership Binormalized Data-Reusing", vol. 51, n° 1, p. 124–134, 2003.
- [9] P. S. R. Diniz, M. V. S. Lima, e W. A. Martins, "Semi-blind data-selective algorithms for channel equalization", *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, p. 53–56, 2008.
- [10] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, e E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines", *J. Chem. Phys.*, vol. 21, n° 6, p. 1087–1092, 1953.
- [11] D. Babi, D. J. Klein, I. Lukovits, S. Nikoli, e N. Trinajsti, "Resistance-distance matrix: A computational algorithm and its application", *Int. J. Quantum Chem.*, vol. 90, n° 1, p. 166–176, 2002.
- [12] D. M. Cvetković, M. Doob, e H. Sachs, *Spectra of graphs: theory and application*. Academic Press, 1980.
- [13] Lin Xiao, S. Boyd, e S. Lall, "A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus", *IPSN 2005. Fourth Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, 2005.*, p. 63–70, 2005.
- [14] A. Jadbabaie et al., "Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules", *Proc. Amer. Control Conf.*, vol. 59, n° 1, p. 312–340, 2010.