

Abordagem Comparativa de Técnicas de Filtragem Espacial em Geometrias Linear e Circular de Arranjos de Antenas

Thiago A. Costa, Edemir M. C. Matos, Iury S. Batalha, Bruno S. L. Castro, Gervásio P. S. Cavalcante, Evaldo G. Pelaes

Resumo—O aumento expressivo do número de dispositivos móveis tem exigido melhorias no desempenho o que impulsiona a utilização de antenas inteligentes bem como os estudos relacionados. Este artigo analisa o desempenho dos algoritmos adaptativos supervisionados RLS, SMI e o LMS, aplicando-os nas geometrias linear e circular de arranjos de antenas, verificando em qual dessas geometrias associada a um algoritmo, possui o melhor desempenho. A razão Desejado/Interferente e o tempo de resposta foram usados como métricas de desempenho para avaliar os algoritmos.

Palavras-Chave—Antenas, Algoritmos adaptativos, LMS, RLS, SMI, Arranjo Linear, Arranjo Circular

Abstract—The significant increase in the number of mobile devices has required improvements in performance which impels the use of smart antennas and related studies. This paper analyzes the performance of supervised adaptive algorithms RLS, SMI and the LMS applying them in linear geometries and circular antenna arrays checking which of these geometries associated with an algorithm has the best performance. The desired/jamming ratio and response time were used as performance metrics to evaluate the algorithms.

Keywords—Antennas, Adaptive Algorithms, LMS, RLS, SMI, Linear Array, Circular Array

I. INTRODUÇÃO

Com o crescimento do número de sistemas de comunicação sem fio na atualidade, a qualidade da transmissão e recepção dos sinais fica prejudicada, pois várias tecnologias distintas convivem entre si provocando interferências mútuas, desta forma, melhorias no desempenho dos sistemas de comunicações sem fio tem se tornado uma exigência primordial. Nesse contexto, o uso de arranjos de antenas inteligentes tem grande importância, pois com a capacidade de se distinguir os diversos sinais que chegam de direções diferentes podem melhorar a qualidade da transmissão, direcionando o ganho do sinal aos usuários desejados e anulando as regiões de sinais interferentes. Assim, a tecnologia de antenas inteligentes promove o aumento do desempenho em diversas aplicações que usam comunicação sem fio, atuando desde em serviços de telefonia celular até sistemas de radares. O estudo e desenvolvimento de sistemas com antenas inteligentes, em diversas aplicações, tem despertado o interesse de pesquisadores, o que pode ser

Thiago A. Costa, Edemir M. C. Matos, Iury S. Batalha, Bruno S. L. Castro, Gervásio P. S. Cavalcante, Evaldo G. Pelaes. Laboratório de Computação e Telecomunicações, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brasil, E-mails: {thiagoaraujo, edemirmatos, iurybatalha, bruno, gervasio, pelaes}@ufpa.br.

constatado pelos inúmeros artigos publicados na literatura, tais como [1], [2], [3], [4]

II. ARRANJO LINEAR UNIFORME DE ANTENAS

Um arranjo de N elementos igualmente espaçados ao longo de uma linha reta corresponde a um arranjo linear uniforme [5]. A Figura 1 ilustra um arranjo linear uniforme de N elementos isotrópicos.

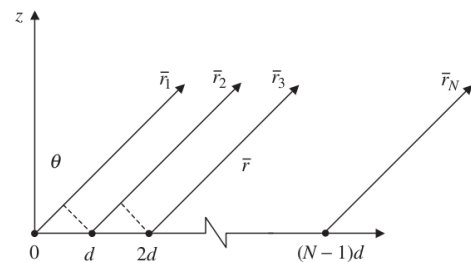


Fig. 1: Arranjo linear de antenas.

Pode-se determinar o fator de arranjo em que cada elemento é ponderado por um complexo pertencente ao vetor \vec{w} através da seguinte equação [5]:

$$AF = \sum_{n=1}^N w_n e^{j(n-1)(kd \sin \theta + \delta)} \quad (1)$$

Onde:

k – Constante de Propagação;

d – Distância entre os elementos;

θ – Ângulo do sinal incidente em relação ao eixo z ;

δ – Diferença de fase entre dois elementos adjacentes;

w_n – Peso complexo associado ao elemento.

III. ARRANJO CIRCULAR

Nessa geometria as antenas estão dispostas na forma de círculo. A Figura 2 mostra um arranjo circular de N elementos isotrópicos, dispostos sobre o plano x - y [5].

Considerando um arranjo circular de raio a onde cada elemento possui uma posição angular ϕ_n e um peso w_n associado, seu fator de arranjo é definido por [5]:

$$AF = \sum_{n=1}^N w_n e^{-j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \delta_n]} + \sum_a^b (x^2 - y^2) \quad (2)$$

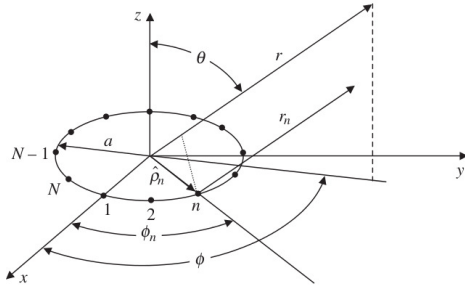


Fig. 2: Arranjo circular de antenas

onde:

k – Constante de Propagação;

θ – Ângulo de elevação;

ϕ – Ângulo de azimute;

δ_n – Diferença de fase entre dois elementos adjacentes;

w_n – Peso complexo associado ao n -ésimo elemento;

ϕ_n – Posição angular associado ao n -ésimo elemento.

IV. ALGORITMOS ADAPTATIVOS SUPERVISIONADOS

Neste artigo serão apresentados alguns dos principais algoritmos adaptativos. O objetivo de um algoritmo adaptativo em sistemas de antenas inteligentes é calcular e atualizar os pesos complexos para que os sinais desejados sejam recebidos e as interferências sejam minimizadas [6]. O processamento funciona da seguinte forma: os sinais recebidos por cada elemento do arranjo são multiplicados por pesos complexos distintos, sendo então esses resultados individuais somados para formar a saída do arranjo. O padrão de radiação do arranjo é moldado ajustando-se os pesos até que um critério seja satisfeito, o ajuste ocorre de forma dinâmica, ou seja, adaptando-se a utilização do espectro no ambiente. A escolha de um algoritmo depende de vários fatores importantes, tais como: taxa de convergência, estabilidade e requisitos computacionais [6].

Estes algoritmos podem ser classificados em duas categorias: algoritmos adaptativos supervisionados e algoritmos cegos [6]. O critério de classificação faz uso de sequências de treinamento. Os algoritmos supervisionados utilizam sequências de treinamento e os cegos não necessitam das mesmas pois geram os sinais de referência a partir de propriedades dos sinais transmitidos[6], [7], [8].

Para calcular o vetor de pesos ótimos w_{opt} , os algoritmos adaptativos supervisionados utilizam a informação de um sinal de referência $d(t)$, conhecido pelo transmissor e receptor. Através do sinal de referência é possível calcular e atualizar os pesos para que o sinal de interesse seja captado[7].

Este trabalho abordará os seguintes algoritmos supervisionados: *Least Mean Square* (LMS), *Sample Matrix Inverse* (SMI) e *Recursive Least Square* (RLS).

A. Algoritmo Least Mean Square

LMS (*Least Mean Square*) é um algoritmo adaptativo baseado no método de estimação do vetor gradiente (*steepest*

descent). Possui a função de custo $J(\bar{w})$, a qual ao ser minimizada representa a solução ótima de Wiener[7], [5].

É um algoritmo adaptativo cujo critério de otimização é o MMSE (*Minimum Mean Square Error*), o qual tem como objetivo minimizar o erro médio quadrático entre a saída do arranjo e o sinal de referência[5].

A estimativa do gradiente da superfície quadrática é usada para se atualizar os pesos, sempre movendo-os em sentido negativo do gradiente, pois deseja-se encontrar os valores mínimos de $J(\bar{w})$ [9].

Os pesos ou coeficientes do LMS são atualizados da seguinte forma:

$$\bar{w}(k+1) = \bar{w}(k) - \frac{1}{2}\mu\nabla_{\bar{w}}(J(\bar{w}(k))) \quad (3)$$

Na equação 3 os pesos devem ser ajustados utilizando-se valores mínimos de $J(\bar{w})$, através do gradiente negativo da função de custo $J(\bar{w})$. A velocidade de convergência e a precisão do algoritmo podem ser controladas através do parâmetro μ .

A função $J(\bar{w})$ é obtida através da seguinte fórmula:

$$J(\bar{w}) = D - 2\bar{w}^H \bar{r} + \bar{w}^H \bar{R}_{xx} \bar{w} \quad (4)$$

Onde:

$$D = E[|d|^2] \quad (5)$$

Calculam-se os valores de $J(\bar{w})$ na Equação 4 através de estimativas da matriz autocorrelação \hat{R}_{xx} e do vetor correlação cruzada \hat{r} definidos, respectivamente, pelas Equações 6 e 7.

$$\hat{R}_{xx}(k) \approx \bar{x}(k)\bar{x}^H(k) \quad (6)$$

$$\hat{r}(k) \approx d^*(k)\bar{x}(k) \quad (7)$$

Se o método do gradiente for aplicado à Equação 4, chega-se a seguinte relação:

$$\nabla_{\bar{w}}(J(\bar{w})) = 2\bar{R}_{xx}\bar{w} - 2\bar{r} \quad (8)$$

Substituindo-se $\nabla_{\bar{w}}(J(\bar{w}))$ na Equação 3 pela Equação 8 obtém-se:

$$\begin{aligned} \bar{w}(k+1) &= \bar{w}(k) - \mu[\hat{R}_{xx}\bar{w} - \hat{r}] \\ &= \bar{w}(k) + \mu e^*(k)\bar{x}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

Sendo o erro e definido pela expressão:

$$e(k) = d(k) - \bar{w}^H(k)\bar{x}(k) \quad (10)$$

Resumidamente, o algoritmo LMS é constituído de três etapas em cada iteração, as quais são: o cálculo do sinal de saída do arranjo utilizando o vetor de pesos atual, cálculo do erro entre a saída do arranjo e o sinal de interesse e a atualização dos pesos com os novos valores de erro [10].

Pode-se representar, respectivamente, as etapas descritas acima pelas Equações 11, 12 e 13.

$$y(k) = w^H(k)x(k) \quad (11)$$

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (12)$$

$$\bar{w}(k+1) = \bar{w}(k) + \mu e^*(k) \bar{x}(k) \quad (13)$$

B. Algoritmo Sample Matrix Inverse

O algoritmo SMI (*Sample Matrix Inverse*) calcula seus pesos ótimos através da solução de Wiener [11], representada na Equação 14.

$$\bar{w}_{opt} = \bar{R}_{xx}^{-1} \bar{r} \quad (14)$$

Onde:

$$\bar{r} = E[d^* \bar{x}] \quad (15)$$

$$\bar{R}_{xx} = E[\bar{x} \bar{x}^H] \quad (16)$$

Para K amostras de sinal, pode-se estimar a matriz de autocorrelação calculando-se a média de tal forma que

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{x}(k) \bar{x}(k)^H \quad (17)$$

De modo semelhante o vetor de correlação cruzada pode ser estimado por:

$$\hat{r} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d^*(k) \bar{x}(k) \quad (18)$$

Os pesos são aplicados às amostras de entrada recebidas dentro do mesmo intervalo de observação. A fim de permitir que o arranjo se adapte à medida que o ambiente mude, os valores da matriz de correlação e o vetor são recalculados para cada intervalo de observação [11].

C. Algoritmo Recursive Least Square

O algoritmo RLS (*Recursive Least Square*) aplica o método dos mínimos quadrados a um conjunto finito de amostras do vetor de entrada. O algoritmo RLS atualiza seu vetor de pesos da seguinte forma:

$$\bar{w}(k) = \bar{w}(k-1) + \bar{g}(k)[d^*(k) - \bar{x}^H(k)\bar{w}(k-1)] \quad (19)$$

Onde o vetor $\bar{g}(k)$ pode ser definido como:

$$\bar{g}(k) = \frac{\alpha^{-1} \hat{R}_{xx}^{-1}(k-1) \bar{x}(k)}{1 + \alpha^{-1} \bar{x}^H(k) \hat{R}_{xx}^{-1}(k-1) \bar{x}(k)} \quad (20)$$

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

As simulações com os algoritmos LMS, RLS e SMI foram realizadas em 10 cenários distintos com a presença de um sinal desejado e de uma fonte interferente. Sendo que cada algoritmo foi implementado nas geometrias linear e circular. Como métrica de desempenho dos algoritmos, foi usado a razão Desejado/Interferente (D/I) que é a razão entre o fator de arranjo no feixe principal e o feixe na direção da fonte interferente [12]. Como o tempo de resposta é outro fator importante na análise dos algoritmos empregados em antenas inteligentes, são apresentados também gráficos contendo o tempo de resposta para cada algoritmo implementado.

Todas simulações tem como parâmetros de entrada constantes os valores da Tabela I.

TABELA I: Dados referentes as simulações

Número de elementos	6
Amostras do sinal	100
Distância entre os elementos	0,5λ
Variância do ruído	0,001

A seguir, será mostrada uma série de simulações, onde as mesmas utilizam os dados presentes na Tabela II:

TABELA II: Dados

	Ângulo do sinal desejado	Ângulo do sinal interferente
Cenário I	10°	60°
Cenário II	-27°	-77°
Cenário III	60°	-81°
Cenário IV	15°	6°
Cenário V	9°	51°
Cenário VI	30°	79°
Cenário VII	39°	-67°
Cenário VIII	-47°	12°
Cenário IX	46°	-6°
Cenário X	-20°	40°

Para uma melhor compreensão das simulações, os gráficos das Figuras 3a e 3b, ilustram a disposição dos feixes direcionados ao AOA (*Angle of Arrival*) do sinal desejado e bem como aos feixes direcionados a fonte interferente. Estes gráficos representam os resultados pertencentes ao Cenário I.

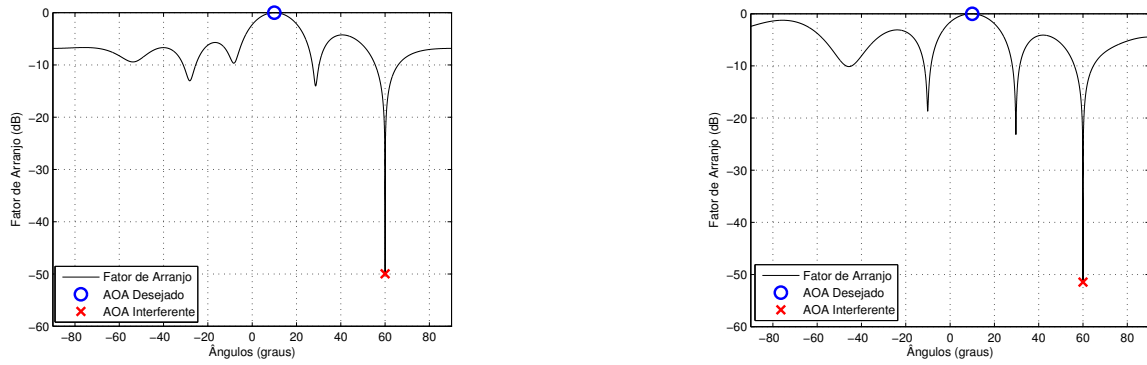
Ao analisar as Figuras 3a e 3b, fica evidente que o algoritmo RLS direcionou o feixe principal na direção do sinal desejado localizado 10°, em contra partida minimizou o sinal interferente em 60°, tanto na geometria circular e como na linear. Os demais algoritmos também tiveram um comportamento semelhante.

A forma de avaliar o desempenho usada foi através da razão D/I [12], calculada para toda modalidade algoritmo/estrutura a exemplo os valores para o Cenário I na Tabela III.

TABELA III: Cenário I

	Razão Desejado/Interferente (dB)	
	Arranjo Linear	Arranjo Circular
LMS	32,69 dB	23,20 dB
RLS	51,21 dB	51,62 dB
SMI	29,31 dB	30,21 dB

Analisando os valores da Tabela III pode-se notar que os RLS obteve a maior razão D/I em ambas as estruturas. Tendo



(a) Arranjo linear com algoritmo RLS em um ambiente com uma fonte desejada em 10° e interferente em 60° (b) Arranjo circular com algoritmo RLS com uma fonte desejada em 10° e interferente em 60°

Fig. 3: Fator de arranjo

uma ligeira vantagem quando associado ao arranjo circular, atingindo o valor de $51,62 \text{ dB}$. Tratando-se dos demais cenários o RLS também obteve a maior razão D/I.

Para facilitar a análise dos resultados a Figura 4 apresenta apenas os resultados dos 10 cenários para a geometria linear, incluindo a média. Pode-se notar que o RLS em todos os cenários teve um maior razão D/I, alcançando uma média de aproximadamente $44,28 \text{ dB}$. A mesma análise pode ser feita para a Figura 5, constatando-se que novamente o RLS obteve os melhores resultados para a geometria circular. No quesito D/I pode-se inferir que o RLS é o melhor algoritmo independente do tipo de estrutura para os 10 cenários estudados.

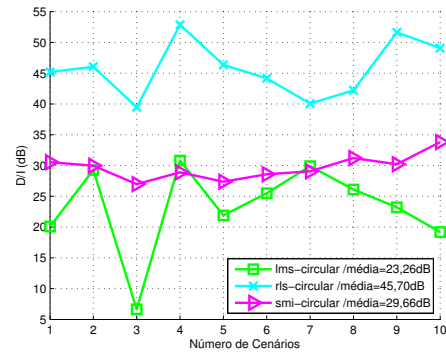


Fig. 5: Resultados para geometria circular

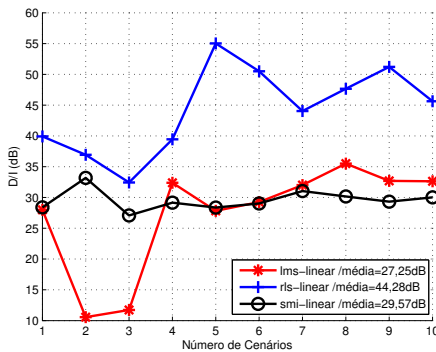


Fig. 4: Resultados para geometria linear

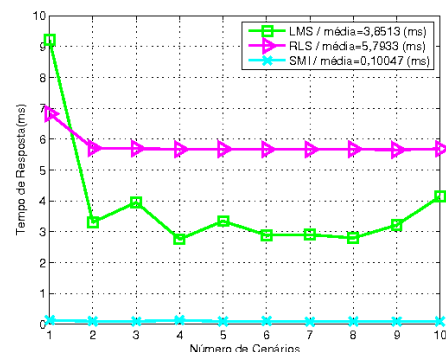


Fig. 6: Gráfico contendo o tempo de resposta para a geometria circular

Outra objeto de estudo deste artigo, refere-se ao tempo de resposta dos algoritmos para as estruturas estudadas. Que está intimamente ligado ao poder de processamento exigido pelo algoritmo [13]. Neste contexto, a Figura 6 ilustra o tempo de resposta dos algoritmos para o arranjo circular, bem como a média, pode-se constatar que o algoritmo SMI obteve a menor média de tempo de resposta com valor próximo de $0,10047 \text{ ms}$. O mesmo pode ser deduzido ao analisar a Figura 7 para o arranjo linear. Para o tempo de resposta pode-se concluir que o SMI é o melhor algoritmo independente do tipo de estrutura para os 10 cenários estudados.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o desempenho de sistemas de antenas inteligentes, implementando os principais algoritmos adaptativos supervisionados em estruturas de arranjos lineares e circulares aplicados a 10 cenários diferentes, nos quais há a presença de um sinal desejado e um sinal interferente. Para tanto, fizemos uso da razão Desejado/Interferente e o tempo de resposta.

Os resultados das simulações mostraram que o algoritmo

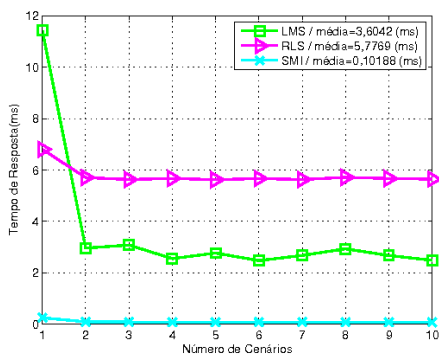


Fig. 7: Gráfico contendo o tempo de resposta para a geometria linear

RLS obteve o melhor desempenho na maioria dos cenários apresentados, principalmente quando associado à geometria circular, tendo alcançado em média $45,70 \text{ dB}$ de razão D/I. Em relação ao tempo de resposta, que está intimamente ligado ao esforço computacional, notamos que o SMI obteve em ambas as estruturas a menor média de tempo de resposta, conseguindo valores próximos a $0,1 \text{ ms}$, sendo portanto o algoritmo mais rápido dos três implementados.

Verificando-se os resultados obtidos, podemos notar que para um ambiente real, o RLS seria a melhor opção, pois apresentou os melhores resultados, devido ao fato de levar em consideração as variações do canal e das fontes, ao descartar as amostras que não mais correspondem ao estado atual do cenário ao calcular a inversa da matriz de autocorrelação, entretanto o RLS obteve a maior média de tempo de resposta nas duas estruturas, exigindo mais processamento. Quando o ambiente não for favorável, por questões de processamento limitado, o algoritmo SMI poderá ser empregado, pois além de ter uma média D/I maior do que o LMS ainda possui média de tempo de resposta menor em ambas geometrias. Assim para aplicações em que o tempo de resposta seja essencial, a melhor solução seria o algoritmo SMI.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem todo apoio empregado pelos membros do Laboratório de Computação e Telecomunicações (LCT) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Ao CNPq pelo apoio financeiro em forma de bolsa.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Jain, S. Katiyar, and N. Agrawal, "Smart antenna for cellular mobile communication," *arXiv preprint arXiv:1204.1790*, 2012.
- [2] S. B. Puttini, "Emprego de antenas adaptativas para a estimação de dados em ambiente cdma," Master's thesis, Universidade de Brasília, 2010.
- [3] T. S. G. Basha, G. Aloysius, B. R. Rajakumar, M. N. G. Prasad, and P. V. Sridevi, "A constructive smart antenna beam-forming technique with spatial diversity," *Antennas Propagation IET Microwaves*, vol. 6, pp. 773–780, May 2012.
- [4] A. S. Oluwole and V. M. Srivastava, "Design of smart antenna using waveguide-fed pyramidal horn antenna for wireless communication systems," in *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1–5, Dec. 2015.
- [5] F. B. Gross, *Smart antennas for wireless communications: with MATLAB*. McGraw-Hill New York, 2005.

- [6] C. A. P. Torquato, "Estudo do efeito de dipolos em arranjos de antenas adaptativas de sistemas de comunicação ds-cdma," Master's thesis, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.
- [7] Z. Rong, "Simulation of adaptive array algorithms for cdma systems," Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [8] J. S. Thompson, P. M. Grant, and B. Mulgrew, "Smart antenna arrays for cdma systems," *Personal Communications, IEEE*, vol. 3, no. 5, pp. 16–25, 1996.
- [9] L. C. Godara, *Smart antennas*. CRC press, 2004.
- [10] J. Litva and T. K. Lo, *Digital beamforming in wireless communications*. Artech House, Inc., 1996.
- [11] B.-L. P. Cheung, "Simulation of adaptive array algorithms for ofdm and adaptive vector ofdm systems," Master's thesis, Citeseer, 2002.
- [12] B. S. L. G. I. . P. M. R. . C. G. P. S. CASTRO, "Nullsteering com arranjos de antenas lineares e circulares: Uma abordagem comparativa envolvendo os algoritmos adaptativos LMS e RLS," *MOMAG SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e o CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2008.
- [13] B. Wescott, *Every Computer Performance Book: How to Avoid and Solve Performance Problems on The Computers You Work With*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.