

UMA SOLUÇÃO ADAPTATIVA COMBINADA APLICADA AO CANCELAMENTO DE SINAIS INTERFERENTES NA RECEPÇÃO GPS

*Cynthia Junqueira^{1,2}, Moisés V. Ribeiro¹
João Batista Destro Filho¹ João Marcos T. Romano¹*

¹Lab. de Proc. de Sinais para Com. Móveis (DSPCom) – Depto. de Comunicações –
Fac. de Eng. Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)
Caixa Postal 6101, CEP: 13083-970, Campinas SP – Brasil
Tel.: 019-37883703, Fax: 019-2891395

²Centro Técnico Aeroespacial – Instituto de Aeronáutica e Espaço
Av. Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, CEP: 12228-904
São José dos Campos SP – Brasil
Tel.: 0**12-347 4937, Fax.: 0**12 347 5019
{mribeiro, destro, romano }@decom.fee.unicamp.br, cynthia@iae.cta.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é aplicar técnicas de *array* de antenas aliadas ao processamento adaptativo espacial com o objetivo de cancelar sinais interferentes, melhorando o desempenho de um receptor GPS. Duas soluções combinadas baseadas no emprego de algoritmos adaptativos com restrições são propostas: a primeira utiliza a técnica com restrição chaveada com o algoritmo LMS convencional; na segunda o LMS é substituído por uma rede neural MLP. Os resultados são comparados entre si, discutindo-se o desempenho dos algoritmos combinados em termos de convergência e do diagrama de irradiação obtido, além de aspectos de complexidade computacional. As simulações consideram um caso crítico e um corriqueiro num ambiente GPS.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade das medidas realizadas por um receptor GPS depende principalmente de dois fatores. Primeiramente, do número de satélites em visada e sua distribuição espacial relativa ao usuário e, em segundo lugar, da qualidade propriamente dita das medidas. Existem várias fontes de erros aleatórias e sistemáticas, tais como erros de relógio não compensados, precisão das posições preditas dos satélites, atrasos de propagação na ionosfera e troposfera não modelados, multi-percursos e ruídos no receptor.

A aplicação de técnicas de antenas adaptativas constitui uma das soluções para cancelamento de interferentes e de multi-percursos, com a conseqüente estimação mais precisa de posição [1]. Na literatura vários trabalhos aplicam arrays de antenas adaptativas como instrumento de cancelamento de interferentes [1], [3], [10]. Neste trabalho, serão propostas e discutidas duas soluções combinadas utilizando antenas adaptativas para cancelamento de interferências no contexto de GPS. Para melhor situarmos nossas contribuições, estruturamos o artigo tal como descrito abaixo.

A seção 2 analisa as antenas adaptativas como dispositivo de cancelamento de interferentes, a seção 3 trata das técnicas com

restrições, apresentando o algoritmo de Frost e Resende, a seção 4 apresenta as técnicas supervisionadas, descrevendo os algoritmos MLP (*Multilayer Perceptron*) e LMS, enquanto que na seção 5 são propostas e comparadas as soluções combinadas. A seção 6 apresenta os resultados das simulações e as conclusões finais são apresentadas na seção 7.

2 ANTENAS ADAPTATIVAS COMO DISPOSITIVO DE CANCELAMENTO DE INTERFERENTES

No receptor GPS, o cálculo da posição através dos valores medidos de quatro ou mais satélites é feito automática e continuamente. Cada satélite GPS transmite sinal DS-CDMA com portadora modulada em BPSK, numa taxa de transmissão de 50 bits/s [1],[2].

Os sinais transmitidos sofrem degradações originadas por diferentes fontes de erro que podem ser agrupadas, de maneira resumida, em seis grupos: dados do almanaque, relógio do satélite, ionosféricos, troposféricos, multi-percurso e do receptor.

Entre estes, deteremo-nos neste trabalho, nos erros de multi-percurso, causados por reflexões dos sinais oriundos dos satélites, gerando interferentes no receptor. Estes efeitos tendem a ser mais pronunciados em receptores estáticos próximos de grandes superfícies de reflexão ou receptores dinâmicos. Os níveis de interferência podem sobrecarregar qualquer tipo de sistema de rádio-navegação e o sistema GPS não é exceção.

A maioria dos sinais refletidos por multi-percurso chegam de ângulos próximos ao horizonte. Assim, para a redução de efeitos de multi-percurso, deve-se ter uma antena cujo diagrama de irradiação apresente baixo ganho nestas direções. Antenas com diagrama de irradiação omnidirecionais muitas vezes não conseguem bloquear os sinais vindos naquelas direções, contribuindo para prejudicar o cálculo preciso do receptor[1].

Neste contexto, as próximas seções analisam o desempenho de técnicas baseadas em *array* de antenas adaptativas, objetivando o

cancelamento de sinais interferentes através da inserção de nulos no diagrama de irradiação, na direção dos interferentes.

Serão alvos de estudo os chamados *arrays* lineares, cujo tratamento matemático é mais simples, embora existam outras configurações de antenas utilizadas com sucesso, dentre as quais podemos ressaltar os *arrays* circulares e planares [3].

A figura 1 representa um arranjo linear de antenas. Nele cada sinal $u_n(k)$, presente no n-ésimo elemento no instante k, é o somatório dos sinais desejados e interferentes, $s_i(k)$, sendo que cada sinal desejado ou interferente tem uma direção de chegada ϕ_i . Matematicamente, para o modelo de *array* linear adotado, temos:

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^I a_n(\phi_i) s_i(k) e^{j(f_n(\phi_i))}, \quad n = 1, \dots, N \quad (1)$$

onde: $a_n(\phi_i)$ é a resposta complexa do n-ésimo elemento do *array* na direção ϕ_i e $f_n(\phi_i) = -2\pi n \frac{d}{\lambda} \sin \phi_i$ é uma função associada à geometria linear, que explicita a fase acrescida ao sinal no n-ésimo elemento, em relação à fase do sinal no elemento de referência.

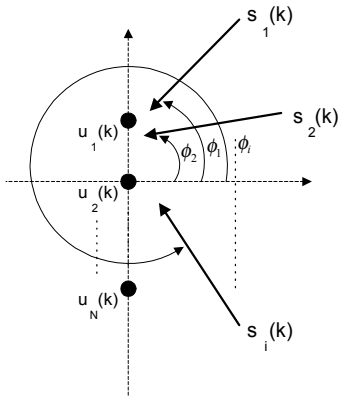


Figura 1. Array Linear

Baseados neste modelo, na seção 5 é proposto uma solução combinada, baseada no chaveamento entre algoritmos adaptativos com restrições e algoritmos supervisionados, seja na forma de uma rede MLP como de um filtro FIR-LMS. Para uma melhor compreensão da teoria proposta, apresentamos brevemente nos dois próximos itens os algoritmos com restrições e as técnicas supervisionadas.

3. ALGORITMOS COM RESTRIÇÕES

A utilização de algoritmos com restrições faz com que o cancelamento de interferentes ocorra pela imposição de restrições na adaptação dos pesos das antenas, tal que seja mantida uma determinada resposta de amplitude constante e fase linear na direção do sinal desejado.

Deve-se ressaltar que no presente trabalho as condições de simulação, tais como número de satélites visíveis, número de

fontes interferentes aliadas a seus respectivos ângulos de chegada, relação sinal/ruído e relação sinal/interferente, são características do problema de GPS.

As restrições impostas são obtidas a partir das estimativas das direções de chegada (DOA – *Direction of Arrival*) dos sinais incidentes através da estimação de um espectro de ângulo. Muitas são as técnicas apresentadas na literatura para a realização desta estimativa, aqui optou-se pelo algoritmo MUSIC [12], seu desenvolvimento aplicado a condições de um cenário típico de um receptor GPS é apresentado em [4].

A partir das direções estimadas, pode-se aplicar sobre o *array* os algoritmos adaptativos com restrições lineares

Tais algoritmos são baseados na minimização de potência (ou variância) do sinal de saída, sendo comumente denominados na literatura como LCMV (“*Linear Constrained Minimum Variance*”) [5]. Uma vez que o critério MV leva naturalmente a anular o sinal de saída, são as próprias restrições, impostas sobre os pesos do *array*, que fornecem a conformação desejada à sua resposta. No caso, as restrições serão de forma a dar um ganho unitário nas direções desejadas e nulo na dos interferentes.

Desta forma, se $\mathbf{w}(k)$ é o vetor dos pesos atribuídos a cada elemento do *array* no instante k, o conjunto de restrições a ele impostas é expresso por:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{w}(k) = \mathbf{f} \quad (5)$$

onde \mathbf{C} é a matriz de restrições e \mathbf{g} é o vetor de restrições tal que:

$$\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_I] \quad (6)$$

sendo que, nos casos aqui tratados, temos $I = 7$ e:

$$f_i = \begin{cases} 0dB & , \text{ para } i = 1, \dots, 4 \\ -30dB & , \text{ para } i = 5, 6, 7 \end{cases} \quad (7)$$

considerando-se 30dB abaixo do lóbulo principal uma atenuação suficiente do ganho da antena para o cancelamento de sinais interferentes.

e ainda:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{jf(\theta_1)} & e^{jf(\theta_2)} & \dots & e^{jf(\theta_I)} \\ e^{j2f(\theta_1)} & e^{j2f(\theta_2)} & \dots & e^{j2f(\theta_I)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j(N-1)f(\theta_1)} & e^{j(N-1)f(\theta_2)} & \dots & e^{j(N-1)f(\theta_I)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.1. Algoritmo de Frost

O algoritmo adaptativo de Frost (FR) é uma técnica do tipo gradiente estocástico (LMS) com restrições, cujos princípios e dedução estão propostos em [8]. Limitando-se a transcrever o resultado, por motivos de espaço, temos que a fórmula de adaptação é dada por :

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \mu [\mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T] \mathbf{R}_{uu} \mathbf{w}(k) + \mathbf{C}(\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} [\mathbf{f} - \mathbf{C}^T \mathbf{w}(k)] \quad (9)$$

O algoritmo FROST pressupõe o conhecimento das direções de chegada estimadas, expressas pela matriz \mathbf{C} . As restrições impostas são de ganho 0dB na direção dos sinais desejados e -30dB na direção dos interferentes, conforme dado pelo vetor \mathbf{f} .

3.2. Algoritmo de Resende

Um algoritmo com restrições do tipo recursivo de mínimos quadrados (RLS), também conhecido como CFLS foi proposto por Resende et al. em [6]. Na forma aqui apresentada, trata-se também da minimização de um critério do tipo LCMV. Pode-se dizer que o algoritmo CFLS é uma versão com restrições dos algoritmos rápidos de mínimos quadrados (FLS), assim como o de Frost é uma versão com restrições do LMS. Por isso mesmo, apresentam uma diferença de desempenho, principalmente em termos de precisão de estimação e velocidade de convergência, tal como seria esperado para técnicas do tipo LMS e RLS aplicado a sinais correlacionados [6],[7].

Como o equacionamento do algoritmo RES é bastante extenso e já apresentado anteriormente [6],[4], será mostrada apenas a fórmula de adaptação onde a atualização é feita através de um algoritmo RLS [8], e a atualização da matriz $Q(k+1)$

leva à adaptação dos pesos do array:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{Q}(k+1)\mathbf{f} \quad (10)$$

sabendo-se que:

$$Q(k+1) = Q'(k+1) + C[C^H C]^{-1} [I - C^H Q'(k+1)] \quad (11)$$

4. TÉCNICAS SUPERVISIONADAS

4.1 Rede Neural MLP

Redes neurais artificiais são sistemas que imitam algumas habilidades computacionais do sistema nervoso biológico, utilizando um grande número de elementos básicos interconectados, chamados neurônios artificiais.

As redes perceptron multicamadas (RNMLP) são redes de processamento direto, isto é, não realimentado, compostas de unidades escondidas as quais são formadas de neurônios do tipo perceptrons [11].

Neste trabalho foram consideradas as RNMLP com uma única camada intermediária, onde os neurônios da camada escondida recebem as entradas ponderadas da rede.. Sabendo-se:

$$\text{Vetor de } M \text{ entrada: } \mathbf{x} = [1, x_0, x_1, \dots, x_{M-1}]^T$$

$$\text{Vetor de } N \text{ saída: } \mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$$

Matriz de pesos entre a camada de entrada e a camada intermediária, para H neurônios e considerando o *bias*:

$$A_{(M+1) \times H}$$

Matriz de pesos entre a camada intermediária e a camada de saída, para H neurônios e considerando o *bias*:

$$B_{(H+1) \times N}$$

Considerando a tangente hiperbólica como função de ativação, o vetor de saída da rede é dado por

$$\mathbf{y} = \left(\frac{e^{\boldsymbol{\tau} \mathbf{x}^T \mathbf{A}} - e^{-\boldsymbol{\tau} \mathbf{x}^T \mathbf{A}}}{e^{\boldsymbol{\tau} \mathbf{x}^T \mathbf{A}} + e^{-\boldsymbol{\tau} \mathbf{x}^T \mathbf{A}}} \right)^T \mathbf{B} \quad (12)$$

Onde $\boldsymbol{\tau}$ é uma constante que afeta a inclinação da sigmóide.

A atualização dos parâmetros da rede é obtida através da minimização da função erro [11].

4.2 Algoritmo LMS

O LMS é membro da família dos algoritmos do gradiente estocástico [7]. Sua expressão é elegante e extremamente simples, restringindo-se a uma soma e dois produtos e não necessita de cálculos de médias ou de quadrados. Entretanto sua velocidade de convergência, para entradas correlacionadas, é baixa se comparada a de outros algoritmos como o RLS.

A característica de convergência possibilita uma faixa de valores para o fator de convergência, μ , tal que garanta estabilidade, sendo a velocidade de convergência dependente da variação dos autovalores da matriz de auto-correlação do sinal de entrada \mathbf{R} .

A atualização recursiva do vetor peso é dada pela relação:

$$\hat{\mathbf{w}}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu \mathbf{x}(k)[d'(k) - \mathbf{x}^H(k)\hat{\mathbf{w}}(k)] \quad (13)$$

A cada iteração, os coeficientes são atualizados e isto requer o conhecimento dos valores mais recentes da entrada $\mathbf{x}(k)$, sinal desejado $d(k)$ e estimador de peso $\hat{\mathbf{w}}(k)$.

5. PROPOSTA DE UMA SOLUÇÃO COMBINADA

A busca de uma solução combinada utilizando algoritmos com restrições nasceu da necessidade de melhor desempenho para o *array* de antenas, de forma a garantir de maneira mais eficiente e rápida o cancelamento de interferentes na recepção GPS.

A estrutura combinada trabalha com um sistema de controle e chaveamento conforme apresentado na figura 2, o qual permite estabelecer tanto um tempo adequado para nova estimativa de direção de chegada, quanto de tempo ou número de iterações de chaveamento do algoritmo com restrição para os algoritmos supervisionados [9]

A necessidade de uma nova estimativa de DOA se justifica pela movimentação dos satélites e pela movimentação do receptor se estivermos utilizando sistemas dinâmicos.

A partir da estimação de DOA, o algoritmo com restrição, Frost ou Resende, inicia seu processamento e assim que a convergência é atingida, chaveia para a estrutura RNMLP ou LMS, conforme a combinação previamente realizada.

A RNMLP ou LMS recebe então como seqüência de treinamento a saída do algoritmo com restrição. Realiza-se, pelo controle, um treinamento adicional da estrutura RNMLP ou LMS para garantir uma melhor convergência.

Os pesos do filtro adaptativo LMS é inicializado a partir dos pesos do algoritmo de Frost ou Resende.

A estrutura dos algoritmos com restrição foi desenvolvida em paralelo, de forma que cada algoritmo adaptativo esteja associado a cada sinal desejado.

Fatores como custo computacional, constelação da saída modulada BPSK e diagrama de irradiação da rede são fatores observados para melhor analisar o desempenho das soluções combinadas no contexto de *array* de antenas e do GPS.

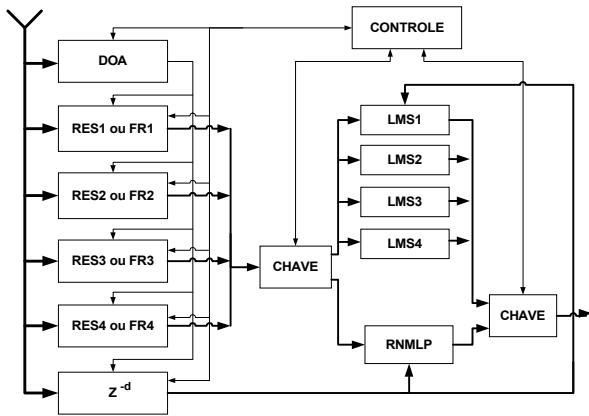


Figura 2. Estrutura da Solução Adaptativa Combinada

6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para uma melhor verificação e comparação do desempenho das soluções combinadas aplicadas a um *array* de antenas, traçou-se um cenário para as simulações onde, conforme anteriormente citado, utilizou-se um *array* linear de 8 antenas isotrópicas, para o qual foi determinado, via algoritmo MUSIC, o ângulo de chegada dos 7 sinais incidentes nas antenas.

Estabeleceu-se também uma relação sinal/ruído e sinal/interferente bastante severa, da ordem de 14,8 dB para SNR e 3 dB para SIR. Estes valores mantiveram-se inalterados apesar de serem variados os ângulos de incidência de sinais do cenário. Para o primeiro cenário (C1), considerado crítico, foi estabelecido que os sinais desejados vinham de satélites com elevações de 0°, 60°, 330° e 300°. Os sinais interferentes vinham das elevações 315°, 85° e 275°. No segundo cenário (C2), considerado corriqueiro, os sinais desejados vinham de satélites com elevações de 18°, 60°, 80° e 30°, sendo que os interferentes vinham de satélites nas elevações de 45°, 300° e 350°, conforme referência da figura 1.

Ambos cenários sofreram as mesmas restrições impostas inicialmente, ou seja cancelar os interferentes com -30 dB de ganho e manter os sinais desejados com ganho 0 dB. Quando utilizada a estrutura com a RNMLP utilizou-se 30 neurônios.

O comportamento do algoritmo combinado RES/LMS para o primeiro cenário é apresentado. Observa-se nas figuras de 3 a 6 a constelação das 4 saídas e nota-se claramente que o algoritmo tem problemas de convergência. O pequeno grau de liberdade entre número de antenas do array e sinais recebidos não possibilita o cancelamento do ruído, não permitindo a abertura do olho em duas das saídas. Este fato se deve a que, no momento do chaveamento, a taxa de erro de símbolo (SER), provida pelo algoritmo com restrição, é de 0,0931. Porém o algoritmo LMS não tem robustez para, a partir desta taxa de erro alcançar a convergência.

Deve-se levar em consideração que, na condição crítica, temos sinais interferentes muito próximos de sinais desejados e em

ângulos próximos ao horizonte, fatores que dificultam a convergência do algoritmo.

O diagrama de irradiação da saída 4 é mostrado na figura 7, onde observa-se o cancelamento dos interferentes e dos sinais desejados 1, 2, 3, em níveis abaixo dos estabelecidos, e a captura do sinal desejado 4 no ângulo correto mas com ganho diferente dos 0 dB da restrição, confirmando o resultado apresentado na figura 6. O algoritmo FR/LMS nesta mesma condição apresenta comportamento similar.

Para o segundo cenário (C2) um comportamento semelhante foi obtido, uma vez que não houve abertura de olho para dois dos sinais desejados, apesar de uma diminuição da SER no chaveamento para 0,002.

Já as estruturas combinadas RES/RNMLP e FR/RNMLP no primeiro cenário (C1) mostram-se bastante robustas. Isto pode ser observado nas figuras 8 a 11 que mostram os resultados associados à estrutura combinada FR/RNMLP. A comparação destas figuras com as fig. 3 a 7 mostra que, apesar do algoritmo com restrição RES ou FR gerar valor de SER elevado, a rede neural MLP consegue convergir, necessitando no pior caso (fig.11) apenas de um maior número de iterações para alcançá-la.

Este resultado pode ser também observado no diagrama de irradiação do *array* (fig.12), onde verifica-se o cancelamento dos interferentes e a captura dos desejados dentro dos requisitos das restrições. Comportamento similar é alcançado com a estrutura combinada RES/RNMLP.

Estas estruturas, quando submetidas ao segundo cenário, (C2) convergem para a condição de olho aberto, sem nenhum problema. A facilidade de convergência é aumentada neste cenário pelo espaçamento angular entre os sinais desejados e interferentes. Os resultados do segundo cenário (C2), bem com os diagramas das saídas 1 a 3 do *array* RES/LMS no primeiro cenário (C1) não foram colocados por falta de espaço.

Foi também observado que, quando é aumentado o grau de liberdade entre número de antenas do *array* e o número de sinais incidentes, temos uma diminuição nas taxas de erro de símbolo e conseqüente melhoria na convergência. Quando se utiliza nesta situação as RNMLP pode-se também diminuir o número de neurônios, o que leva a uma diminuição da complexidade computacional.

A complexidade computacional destas soluções combinadas origina-se dos algoritmos de Resende e de Frost, já que são da ordem do quadrado do número M de antenas do *array* [7]. A RNMLP apresenta complexidade na ordem de $4H(M+5)+3(H+1)N$ adições e $2H(M+4)+2(H+1)N$ multiplicações. O algoritmo LMS por sua vez apresenta ordem de $4(M+1)$ adições e $6(M+1)$ multiplicações.

7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este trabalho evidencia que as técnicas de processamento espacial podem abrir novas perspectivas nas aplicações relacionadas com GPS. O uso de algoritmos combinados, preferencialmente com redes neurais, mostram boas soluções dentro dos vários cenários onde o cancelamento de multipropagação e interferentes diversos se faz necessário. Outros cenários, que melhor representem a problemática do GPS,

estão sendo estabelecidos para testes destas soluções combinadas.

Outras configurações de redes de antenas tais como planar ou circular podem vir a mostrar um desempenho muito melhor, e estão sendo estudadas, aliando a diminuição do número de antenas com a resolução de ambigüidades. Estudos futuros estão sendo desenvolvidos no sentido de busca de estimadores de direção de chegada com menor custo computacional. Neste trabalho, o custo computacional dos algoritmos combinados com redes neurais não se mostra proibitivo frente ao desempenho alcançado no cancelamento dos interferentes, à velocidade de convergência dos algoritmos e ao bom resultado dos diagramas de irradiação do *array* de antenas.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Parkinson, B. W., Spilker, J., *Global Positioning System: Theory and Applications*, vol. 1&2, AIAA, 1996.
- [2] Kaplan, E. D., *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House, 1996.
- [3] Compton, R. T., *Adaptive Antennas: Concepts and Performance*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [4] Junqueira, C., Ribeiro, M., Romano, J.M.T., *Adaptive Techniques for GPS Systems Enhancement*, 13TH International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, set. 2000.
- [5] Osório, A. F. da S., *Antenas Adaptativas: Conceitos e Aplicações em Comunicações Móveis*, Tese de Mestrado, UNICAMP, 1998.
- [6] Resende, L. S., Romano, J. M. T., Bellenger, M. G., *A Fast Least-Squares Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Filtering*, Transaction of Signal Processing, vol. 44, n°5, Maio, 1996.
- [7] Haykin, S., *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [8] Frost III, O. L., *An Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Array Processing*, Proc. Of the IEEE, vol. 60, Agosto 1972.
- [9] Junqueira, C., Ribeiro, M., Romano, J.M., Destro Filho, J.B., Lima, C., *A Hybrid Algorithm Solution for GPS Antenna Array*, International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, jun. 2001.
- [10] Applebaum, "P., "Adaptive Arrays", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, sept. 1976
- [11] Haykin, S. *Neural Networks: A comprehensive Foundation* MacMillan Publishing Company, 1994.
- [12] Libetti, J. Jr., Rappaport, T.S., *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Thrid Generation CDMA Applications*, Prentice Hall, 1999.

AGRADECIMENTOS

Especiais agradecimentos a Romis R. Attux da UNICAMP pelo apoio e discussões e ao CTA/IAE que possibilitou a realização deste trabalho.

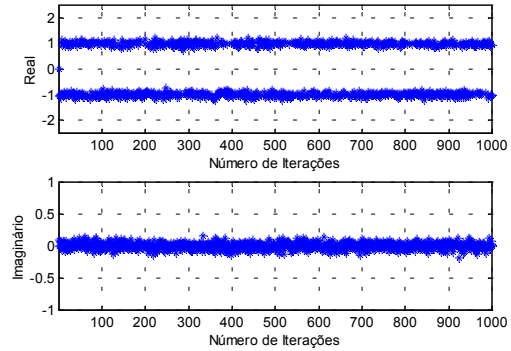


Figura 3. Evolução Temporal da Saída 1 - RES/LMS -C1

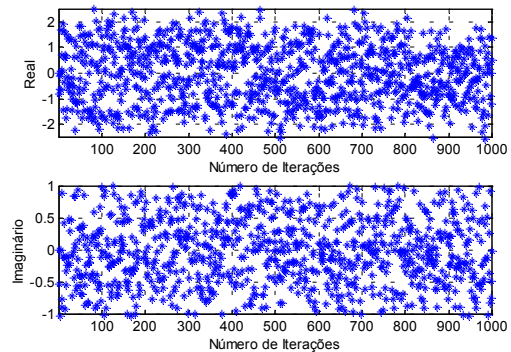


Figura 4. Evolução Temporal da Saída 2 - RES/LMS -C1

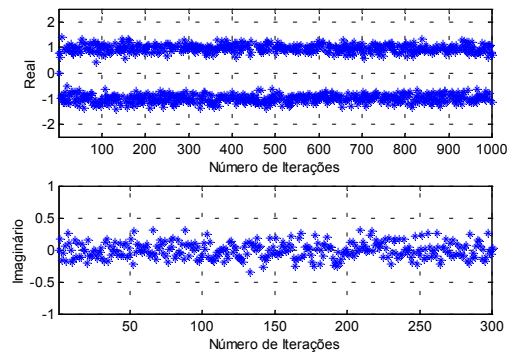


Figura 5. Evolução Temporal da Saída 3 - RES/LMS -C1

Figura 6. Evolução Temporal da Saída 4 - RES/LMS -C1

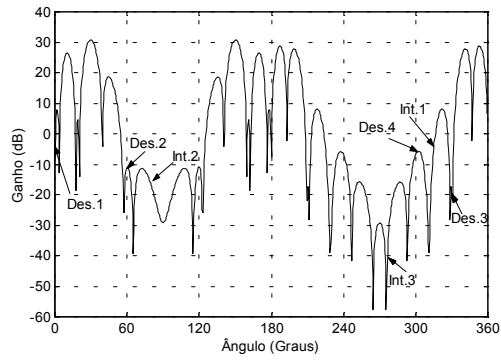


Figura 7. Diagrama de Irradiação do *Array*-RES/LMS-C1

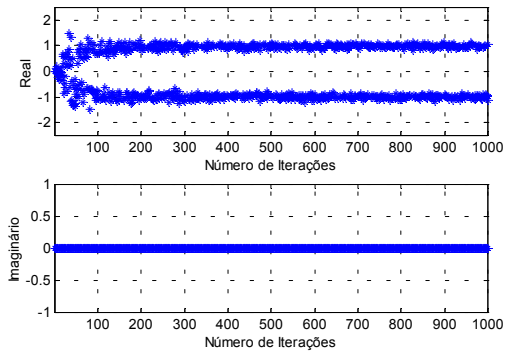


Figura 8. Evolução Temporal da Saída 1 FR/RNMLP -C1

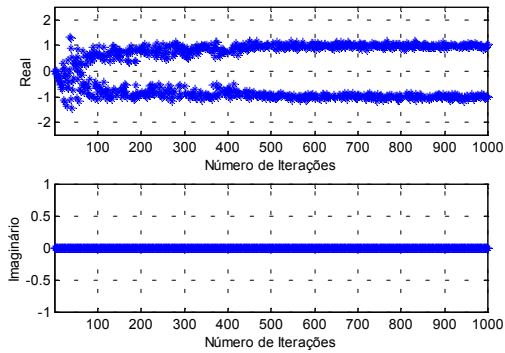


Figura 9. Evolução Temporal da Saída 2 FR/RNMLP -C1

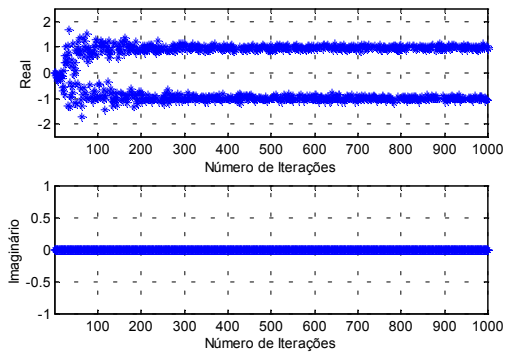


Figura 10. Evolução Temporal da Saída 3 FR/RNMLP -C1

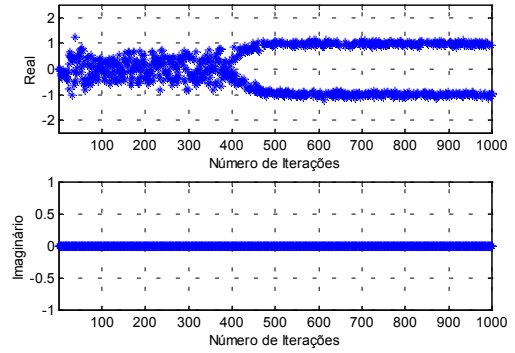


Figura 11. Evolução Temporal da Saída 4 FR/RNMLP -C1

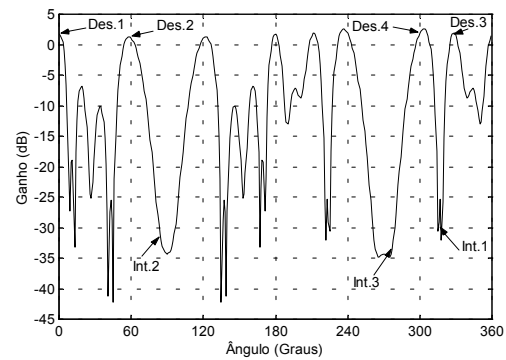


Figura 12. Diag. de Irradiação do *Array* FR/RNMLP-C1