

Considerações sobre o Comportamento do Algoritmo CSG Aplicado em Sistemas de Comunicação Móvel Celular

Javier E. Kolodziej, Orlando J. Tobias e Rui Seara

Resumo—O propósito deste artigo é descrever e corrigir um comportamento impróprio do algoritmo *constrained stochastic gradient* (CSG) utilizado em sistemas de comunicações móveis. Esse comportamento anormal (denominado comportamento não-balanceado) leva o algoritmo CSG a priorizar a minimização da interferência de co-canal em detrimento da maximização da potência radiada para o terminal da própria célula. Utilizando expressões de um modelo estatístico do algoritmo CSG, é obtida uma explicação teórica para a existência de tal comportamento, bem como é proposta uma versão melhorada desse algoritmo visando compensar o seu comportamento não-balanceado. A eficácia do novo algoritmo é avaliada através de simulações numéricas.

Palavras-chave—Algoritmo CSG, arranjos de antenas adaptativas para comunicações móveis, modelagem estatística.

Abstract—The aim of this paper is to report and correct an unsuitable behavior of the constrained stochastic gradient algorithm (CSG) used in mobile communications. This anomalous behavior (termed unbalanced behavior) leads the CSG algorithm to stress the co-channel interference minimization more than the maximization of the power radiated to the in-cell mobile terminal. Based on CSG algorithm model expressions, a theoretical explanation for such a behavior is presented. In addition, an improved algorithm is proposed aiming to compensate the unbalanced behavior of the CSG algorithm. The effectiveness of the proposed algorithm is verified through numerical simulations.

Keywords—CSG algorithm, adaptive antenna arrays for mobile communications, statistical modeling.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as redes de comunicações móveis vêm experimentando um aumento crescente no número de usuários, gerando, assim, sérios problemas em ambientes densamente urbanizados, visto que o espectro de frequências está se aproximando do limite de sua capacidade [1]. Para superar a barreira do espectro limitado, é necessário reduzir o tamanho das células, aumentando, dessa forma, a reutilização de frequências do espectro considerado [2]. Porém, ao reduzir o tamanho das células

aumenta-se o nível de interferência de co-canal. Uma estratégia para mitigar tal interferência é utilizar, na estação de rádio base (ERB), arranjos de antenas com diagramas de radiação conformados segundo a posição dos terminais móveis tanto da própria célula quanto do co-canal. De forma ideal, qualquer ERB em operação deveria conhecer a posição de todos os terminais móveis da área, permitindo assim obter uma solução global otimizada para as condições de operação consideradas. No entanto, tal procedimento não é possível de ser implementado; nos sistemas atuais, toda a informação conhecida por uma ERB sobre os terminais móveis das células vizinhas é obtida através dos sinais do enlace reverso (*uplink*) do arranjo. Então, dispondo-se dessa informação, pode-se focar uma abordagem em que as células vizinhas reduzam as potências transmitidas na direção dos terminais móveis do co-canal, reduzindo-se, assim, a interferência de uma forma global.

Nos sistemas em que a comunicação bidirecional (*full-duplex*) é obtida através da técnica de divisão de frequência (FDD – *frequency division duplex*), um canal é utilizado para o enlace reverso (*uplink*) e outro, próximo dele, para o enlace direto (*downlink*). Assim, as bandas consideradas dos enlaces são suficientemente próximas, forçando que a geometria do ambiente de propagação seja similar para ambos, obtendo-se assim estatísticas muito próximas para os processos envolvidos. Uma técnica, discutida recentemente em [3] e [4], considera essa característica para obter (a partir de medidas do enlace reverso) uma estimativa das matrizes de covariância tanto do sinal do enlace direto quanto do sinal interferente. Tal informação é fundamental para controlar arranjos de antenas adaptativas. Em [5], esse procedimento é utilizado para estabelecer uma função-custo, cuja maximização aproxima uma solução ótima global em uma rede cooperativa, sem a necessidade de comunicação entre células. A partir dessa função-custo, é obtido o algoritmo denominado de *constrained stochastic gradient* (CSG). O CSG é um algoritmo de baixa complexidade computacional e com uma característica de convergência muito boa, tornando-se uma alternativa interessante à medida que o número de elementos do arranjo cresce [5]. Através de uma análise do algoritmo CSG, utilizando as expressões do modelo estatístico proposto em [6], verifica-se a existência de um comportamento anormal, aqui denominado comportamento não-balanceado. As expressões que descrevem o comportamento médio dos pesos, apresentadas em [6], permitem alcançar dois importantes objetivos neste trabalho:

- i) Explicar o comportamento não-balanceado do algoritmo CSG.
- ii) Sugerir uma modificação no algoritmo CSG padrão visando compensar o comportamento não-balanceado.

Javier E. Kolodziej e Rui Seara, LINSE – Laboratório de Circuitos e Processamento de Sinais, Depto. de Eng. Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, E-mails: {javier, seara}@linse.ufsc.br.

Orlando J. Tobias, LINSE/UFSC e Depto. Eng. Elétrica e Telecom., Universidade Regional de Blumenau, SC, E-mail: tobias.oj@ieee.org.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Este trabalho está organizado como segue. A Seção II apresenta as equações de atualização do algoritmo CSG. Na Seção III, são mostrados resultados de simulação, evidenciando o comportamento não-balanceado do algoritmo CSG padrão para algumas condições. A Seção IV discute o comportamento não-balanceado do algoritmo CSG baseado nas expressões de seu modelo estatístico, sugerindo uma modificação do algoritmo CSG. A Seção V mostra alguns resultados de simulações atestando a eficácia do algoritmo CSG modificado (algoritmo proposto). Finalmente, na Seção VI, são apresentadas as conclusões deste trabalho de pesquisa.

II. ALGORITMO CSG

Em um arranjo de antenas adaptativas, o algoritmo tem por objetivo maximizar a potência radiada para o terminal móvel (TM) da própria célula P_{IC} e ao mesmo tempo minimizar a potência radiada para os TMs de co-canal nas outras células P_{CC} . Essas potências são expressas como

$$P_{IC} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{IC} \mathbf{w} \quad (1)$$

e

$$P_{CC} = \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{CC} \mathbf{w} \quad (2)$$

onde $\mathbf{w} = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M]^T$ denota o vetor de pesos, e \mathbf{R}_{IC} e \mathbf{R}_{CC} são, respectivamente, as matrizes de covariância do enlace direto do sinal da própria célula e do sinal interferente de co-canal. Assim, o algoritmo adaptativo deve maximizar a seguinte expressão [5]:

$$\xi = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{IC} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H (\mathbf{R}_{CC} + \mathbf{I}) \mathbf{w}} \quad (3)$$

onde \mathbf{I} é a matriz identidade. Note que o vetor de pesos complexo \mathbf{w} em (3) é considerado fixo. Em [5], o algoritmo CSG é derivado considerando uma interpretação intuitiva de (3). Desse modo, para maximizar (3), o algoritmo de descida mais íngreme é utilizado para minimizar a potência de co-canal junto com o algoritmo de subida mais íngreme usado para maximizar a potência do sinal da própria célula. Já que dois processos de otimização estão acontecendo simultaneamente, um esquema de adaptação em dois estágios é utilizado. No primeiro estágio, o numerador de (3) é adaptado mantendo o denominador fixo e, no segundo, o denominador é adaptado, considerando o numerador fixo. Matematicamente, esse processo pode ser implementado incorporando uma matriz de projeções na equação de atualização. Para tal, o algoritmo CSG considera o sinal de enlace reverso da própria célula $s(n)$ e o sinal interferente $u(n)$ de cada elemento do arranjo, agrupados, respectivamente, nos vetores $\mathbf{s}(n)$ e $\mathbf{u}_k(n)$ para estimar as matrizes de covariância. Assim, para o caso de dois interferentes, as equações de atualização dos coeficientes adaptativos são dadas por [5]

$$\mathbf{v}_1(n) = \mathbf{w}(n) + \mu_s \left[\mathbf{I} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_1}(n)}{\|\mathbf{u}_1(n)\|^2} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_2}(n)}{\|\mathbf{u}_2(n)\|^2} \right] \hat{\mathbf{R}}_s(n) \mathbf{w}(n) \quad (4)$$

e

$$\mathbf{v}_2(n) = \mathbf{v}_1(n) - \mu_u \left[\mathbf{I} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_s(n)}{\|\mathbf{s}(n)\|^2} \right] [\hat{\mathbf{R}}_{u_1}(n) + \hat{\mathbf{R}}_{u_2}(n)] \mathbf{w}(n) \quad (5)$$

com

$$\mathbf{w}(n+1) = \frac{\mathbf{v}_2(n)}{\|\mathbf{v}_2(n)\|} \quad (6)$$

onde $\hat{\mathbf{R}}_s = \mathbf{s}(n)\mathbf{s}^H(n)$ e $\hat{\mathbf{R}}_{u_k} = \mathbf{u}_k(n)\mathbf{u}_k^H(n)$ denotam matrizes de covariância estimadas. Os parâmetros μ_s e μ_u são os correspondentes passos de adaptação do algoritmo. O vetor de pesos é normalizado a cada iteração, mantendo o termo $\mathbf{w}^H(n)\mathbf{I}\mathbf{w}(n)$ constante em (3).

III. COMPORTAMENTO NÃO-BALANCEADO

O propósito desta seção é identificar, através de exemplos, a degradação de desempenho do algoritmo CSG para algumas condições especiais. Posteriormente, mostra-se que tal fenômeno tem uma explicação teórica ocorrendo devido a uma combinação de dois efeitos: (a) um ou mais ângulos de chegada do sinal interferente apresentam valores numéricos próximos ao do ângulo de chegada do sinal de enlace reverso e (b) os ângulos de dispersão dos sinais envolvidos são pequenos. Em todas as simulações apresentadas neste trabalho, as matrizes de covariância são determinadas segundo o procedimento discutido em [5], considerando doze caminhos de dispersão independentes ($I=12$). Para os sinais de enlace direto, é considerada uma razão sinal-ruído $\rho_{IC} = 36$ dB e uma razão interferência-ruído $\rho_{CC} = 15$ dB, representando uma situação prática usual [5]. Para as simulações Monte Carlo (MC), são consideradas 100 realizações independentes e é assumido que os arranjos de antenas envolvidos são controlados pelo mesmo algoritmo adaptativo operando de forma autônoma.

Definidas as condições de operação, primeiramente é considerado um caso no qual o algoritmo CSG tem um comportamento normal e, em seguida, outra situação ocorrendo de um comportamento não-balanceado.

A. Caso 1 (θ_s, θ_{u_1} e θ_{u_2} distantes)

Para o canal de enlace reverso, o ângulo de chegada do sinal é $\theta_s = 60^\circ$ e os ângulos de chegada dos interferentes são $\theta_{u_1} = -12^\circ$ e $\theta_{u_2} = 36^\circ$. Outros parâmetros são: dispersão do ângulo de chegada $\Delta_s = \Delta_u = 3^\circ$, número de elementos do arranjo $M = 4$, passos de adaptação $\mu_s = \mu_u = 0,05$ (ver Fig. 1).

B. Caso 2 ($\theta_s = \theta_{u_1}$)

Os parâmetros utilizados são os mesmos considerados no Caso 1, exceto que agora $\theta_s = \theta_{u_1} = -12^\circ$. A Fig. 1 mostra a evolução da razão sinal-interferência-mais-ruído (*signal-to-interference-plus-noise ratio* - SINR) do algoritmo CSG para os Casos 1 e 2 avaliados. Note que há uma nítida degradação de desempenho do algoritmo atestada pela curva da SINR para as condições definidas no Caso 2 analisado. Na Fig. 2, apenas a potência radiada para o TM dentro da própria célula é mostrada. A Fig. 3 apresenta o diagrama de radiação do arranjo de antenas para o Caso 2, considerando que o algoritmo adaptativo atingiu o regime permanente.

De acordo com a Fig. 3, observa-se que, nas condições para o Caso 2, o TM não recebe potência suficiente da ERB, indicando que o serviço foi interrompido.

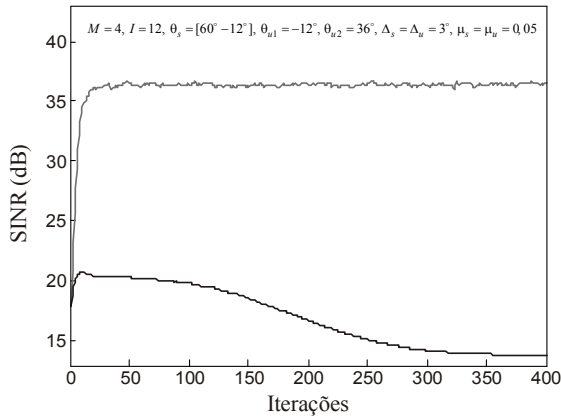


Fig. 1. Evolução da SINR para os casos considerados. (Linha cinza) Caso 1. (Linha escura) Caso 2.

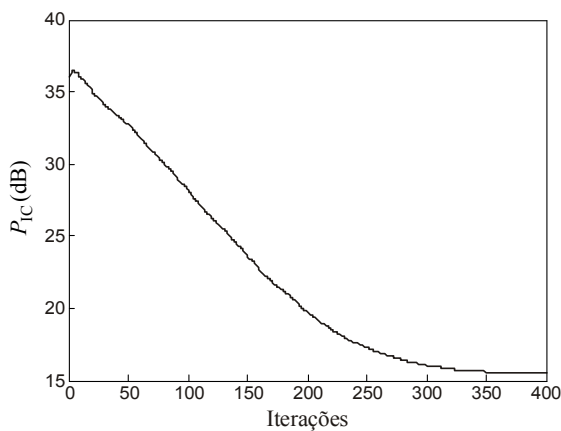


Fig. 2. Evolução da P_{IC} para o Caso 2.

$M = 4, I = 12, \theta_s = -12^\circ, \theta_{u1} = -12^\circ, \theta_{u2} = 36^\circ, \Delta_s = \Delta_u = 3^\circ, \mu_s = \mu_u = 0,05$

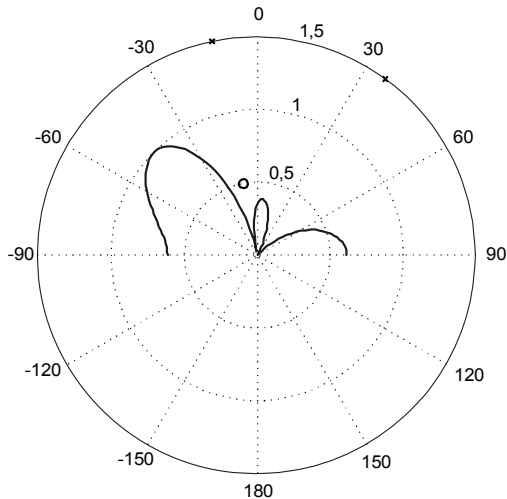


Fig. 3. Caso 2. Diagrama de radiação. Terminal móvel da própria célula (o). Interferentes (x).

IV. ANÁLISE

Nesta seção, é discutida a causa de degradação do algoritmo CSG usando o modelo do comportamento médio dos coeficientes do referido algoritmo apresentado em [6]. A partir dessa discussão, é proposta uma modificação no algoritmo CSG, melhorando significativamente o seu desempenho para algumas condições especiais.

A. Comportamento Médio dos Coeficientes

As expressões do modelo que descrevem o comportamento médio dos coeficientes, proposto em [6], são aqui reproduzidas. Assim,

$$E[\mathbf{w}(n+1)] \approx \frac{E[\mathbf{v}_2(n)]}{\|E[\mathbf{v}_2(n)]\|} \quad (7)$$

sendo

$$E[\mathbf{v}_2(n)] = E[\mathbf{v}_1(n)] - \mu_u (\mathbf{I} - \mathbf{R}_s^N) (\mathbf{R}_{u_1} + \mathbf{R}_{u_2}) E[\mathbf{w}(n)] \quad (8)$$

e

$$E[\mathbf{v}_1(n)] = E[\mathbf{w}(n)] + \mu_s (\mathbf{I} - \mathbf{R}_{u_1}^N - \mathbf{R}_{u_2}^N) \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] \quad (9)$$

onde $\mathbf{R}_s^N = E \left[\frac{\mathbf{s}(n)\mathbf{s}^H(n)}{\mathbf{s}^H(n)\mathbf{s}(n)} \right]$ e $\mathbf{R}_{u_k}^N = E \left[\frac{\mathbf{u}_k(n)\mathbf{u}_k^H(n)}{\mathbf{u}_k^H(n)\mathbf{u}_k(n)} \right]$ são as

matrizes de covariância normalizada.

As expressões (8) e (9) foram obtidas para uma condição de adaptação lenta, permitindo: (i) considerar que a evolução de $\mathbf{v}_2(n)$ é suave (condição de dispersão pequena), podendo-se invocar a aproximação (7) [8]; (ii) assumir que o vetor de dados e o vetor de coeficientes são independentes [9]. As matrizes \mathbf{R}_s^N e $\mathbf{R}_{u_k}^N$ são calculadas de forma exata (sem utilizar qualquer aproximação), fornecendo um modelo com muito boa precisão. Substituindo (9) em (8) e a expressão resultante em (7), obtém-se a expressão para o comportamento médio dos coeficientes. Assim,

$$E[\mathbf{w}(n+1)] = \frac{\mathbf{A} E[\mathbf{w}(n)]}{\sqrt{E[\mathbf{w}^H(n)] \mathbf{A}^H \mathbf{A} E[\mathbf{w}(n)]}} \quad (10)$$

onde

$$\mathbf{A} = \mathbf{I} + \mu_s (\mathbf{I} - \mathbf{R}_{u_1}^N - \mathbf{R}_{u_2}^N) \mathbf{R}_s - \mu_u (\mathbf{I} - \mathbf{R}_s^N) (\mathbf{R}_{u_1} + \mathbf{R}_{u_2}). \quad (11)$$

B. Comportamento Não-balanceado

O Caso 2, apresentado na Seção III, indica a existência de uma evidente perda de desempenho do algoritmo CSG para algumas condições especiais. Nesta seção, esse comportamento anômalo do algoritmo em questão é discutido. O algoritmo adaptativo que controla o arranjo de antenas deve ajustar os coeficientes do arranjo de forma que a potência radiada para o TM da própria célula seja maximizada e que a potência radiada para os TMs de co-canal, minimizada. A partir das expressões do modelo apresentado em [6], o comportamento do algoritmo CSG para as diferentes condições de trabalho pode ser prontamente avaliado. Assim, quando ocorre o comportamento não-balanceado, o algoritmo CSG prioriza a minimização da P_{CC} em detrimento da maximização da P_{IC} . Com a ajuda do modelo do algoritmo, é possível entender tal comportamento, o qual é discutido a seguir.

No caso em que o sinal $s(n)$ tem o mesmo ângulo de chegada do sinal interferente $u_1(n)$ e os ângulos de dispersão dos sinais envolvidos são semelhantes, as matrizes de covariância \mathbf{R}_s e \mathbf{R}_{u_1} são aproximadamente iguais. O mesmo ocorre para as matrizes de covariância normalizadas \mathbf{R}_s^N e $\mathbf{R}_{u_1}^N$. Assim, aplicando a propriedade distributiva no segundo termo de (9) e substituindo \mathbf{R}_{u_1} por \mathbf{R}_s e $\mathbf{R}_{u_1}^N$ por \mathbf{R}_s^N , obtém-se

$$E[\mathbf{v}_1(n)] \cong E[\mathbf{w}(n)] + \mu_s \{ \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] - \mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] - \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] \}. \quad (12)$$

Considerando que qualquer matriz \mathbf{R} e sua correspondente versão normalizada \mathbf{R}^N têm os mesmos autovetores [6], então, para cada produto da forma $\mathbf{R}^N \mathbf{R}$, pode-se escrever

$$\mathbf{R}^N \mathbf{R} = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda}^N \mathbf{Q}^H \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^H = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda}^N \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^H \quad (13)$$

onde \mathbf{Q} é a matriz de autovetores de \mathbf{R} , e $\mathbf{\Lambda}$ e $\mathbf{\Lambda}^N$ são matrizes diagonais contendo os autovalores λ_i e λ_i^N (para $i=1, 2, \dots, M$) de \mathbf{R} e \mathbf{R}^N , respectivamente. Quando a dispersão do ângulo de chegada for pequena (por exemplo, $\Delta = 3^\circ$), as matrizes de covariância obtidas a partir do modelo de sinal utilizado em [5] têm grande dispersão, resultando em um autovalor dominante λ_1 , isto é, $\lambda_1 \gg \lambda_2 > \dots > \lambda_M$. Por sua vez, a matriz \mathbf{R}^N tem também um autovalor dominante cujo valor é ligeiramente menor do que 1 [6]. Como resultado, podemos considerar a seguinte aproximação: $\mathbf{\Lambda}^N \mathbf{\Lambda} \cong \alpha \mathbf{\Lambda}$ e $\mathbf{R}^N \mathbf{R} \cong \alpha \mathbf{R}$, para $0 < \alpha < 1$, levando a

$$\mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] \cong \alpha \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]. \quad (14)$$

Desta forma, o termo $\mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ em (9), objetivando maximizar a potência radiada para o TM da própria célula, é reduzido pelo fator $1 - \alpha$. Inversamente, o termo $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$, responsável por minimizar a potência radiada para o TM de co-canal, agora torna-se mais importante. Nesse caso, constata-se através das expressões do modelo que o algoritmo CSG dá mais importância para minimizar a interferência de co-canal, não entregando potência suficiente para o TM da própria célula. Um efeito similar é observado quando $\mathbf{R}_{u_2} \cong \mathbf{R}_s$ ou $\mathbf{R}_{u_1} \cong \mathbf{R}_{u_2} \cong \mathbf{R}_s$.

C. Algoritmo CSG Modificado

Nesta seção, uma alteração no algoritmo CSG é proposta. O algoritmo modificado é denominado algoritmo ICSG (*improved constrained stochastic gradient* - ICSG). O algoritmo ICSG compensa o comportamento não-balanceado do algoritmo CSG discutido anteriormente. Assim, considerando as expressões do modelo para o caso crítico $\mathbf{R}_{u_1} \cong \mathbf{R}_s$, uma possível compensação para o comportamento não-balanceado é reduzir o efeito de $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ da mesma maneira que $\mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ é diminuído por $\mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$. Uma forma direta para fazer isso é incluir o termo $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ na expressão de atualização (9), resultando em

$$E[\mathbf{v}_1(n)] = E[\mathbf{w}(n)] + \mu_s \{ \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] - \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] - \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] + \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] \}. \quad (15)$$

O vetor $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ compensa o mencionado comportamento não-balanceado, como descrito a seguir. Substituindo \mathbf{R}_{u_1} por \mathbf{R}_s em (15), obtém-se

$$E[\mathbf{v}_1(n)] \cong E[\mathbf{w}(n)] + \mu_s \{ \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] - \mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] - \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] + \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)] \}. \quad (16)$$

Da mesma forma que antes, as aproximações $\mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s \cong \alpha \mathbf{R}_s$ e $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s \cong \alpha \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s$ podem ser verificadas. Note que

$\mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ continua ainda reduzindo o efeito de $\mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$; porém, o termo $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ é também reduzido de acordo com $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$. Portanto, o vetor $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]$ contorna o comportamento não-balanceado de (9) quando $\mathbf{R}_{u_1} \cong \mathbf{R}_s$.

Similarmente como antes, para o caso $\mathbf{R}_{u_2} \cong \mathbf{R}_s$, a matriz $\mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_{u_2}^N$ deve também ser incluída na expressão de atualização (9), resultando em

$$E[\mathbf{v}_1(n)] = E[\mathbf{w}(n)] + \mu_s (\mathbf{I} - \mathbf{R}_{u_1}^N - \mathbf{R}_{u_2}^N + \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_{u_2}^N + \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_{u_1}^N) \mathbf{R}_s E[\mathbf{w}(n)]. \quad (17)$$

Em situações não críticas, o produto de matrizes $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s$ e $\mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s$ pode ser desprezado em comparação com \mathbf{R}_s , $\mathbf{R}_{u_1}^N \mathbf{R}_s$, e $\mathbf{R}_{u_2}^N \mathbf{R}_s$, levando a que (17) tenha agora um comportamento similar à (9). Visto que um melhor desempenho é verificado considerando as expressões do modelo (17) e (8), podemos então formular o algoritmo ICSG incluindo estimativas instantâneas das matrizes $\hat{\mathbf{R}}_{u_1}^N \mathbf{R}_{u_2}^N$ e $\mathbf{R}_{u_2}^N \hat{\mathbf{R}}_{u_1}^N$ nas expressões do algoritmo CSG. Portanto, (4) é modificada para

$$\mathbf{v}_1(n) = \mathbf{w}(n) + \mu_s \left[\mathbf{I} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_1}(n)}{\|\mathbf{u}_1(n)\|^2} - \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_2}(n)}{\|\mathbf{u}_2(n)\|^2} + \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_1}(n)}{\|\mathbf{u}_1(n)\|^2} \cdot \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_2}(n)}{\|\mathbf{u}_2(n)\|^2} + \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_2}(n)}{\|\mathbf{u}_2(n)\|^2} \cdot \frac{\hat{\mathbf{R}}_{u_1}(n)}{\|\mathbf{u}_1(n)\|^2} \right] \hat{\mathbf{R}}_s(n) \mathbf{w}(n) \quad (18)$$

com as expressões (5) e (6) permanecendo inalteradas.

O algoritmo proposto também melhora o desempenho do algoritmo CSG para $\mathbf{R}_{u_1} \cong \mathbf{R}_{u_2} \cong \mathbf{R}_s$. Note que, similarmente ao algoritmo CSG, o algoritmo ICSG tem uma reduzida carga computacional com ordem de complexidade $O(M)$.

V. DESEMPENHO DO ALGORITMO ICSG

Esta seção avalia o desempenho do algoritmo ICSG comparando-o com o do algoritmo CSG padrão. Assim, três exemplos são apresentados. Para cada algoritmo, as curvas obtidas a partir de simulações MC e através de previsões do modelo são mostradas objetivando validar a abordagem proposta.

A. Exemplo 1

Neste exemplo, o caso $\mathbf{R}_{u_1} \cong \mathbf{R}_s$ é considerado. Os parâmetros utilizados são $M = 4$, $\theta_s = \theta_{u_1} = -12^\circ$, $\theta_{u_2} = 36^\circ$, $\Delta_s = \Delta_u = 3^\circ$ e $\mu_s = \mu_u = 0,05$. A Fig. 4 mostra a evolução da SINR para os algoritmos CSG e ICSG. Na Fig. 5, o diagrama de radiação do arranjo de antenas é mostrado considerando que os coeficientes do arranjo tenham atingido o regime estacionário.

B. Exemplo 2

Neste exemplo, o caso $\mathbf{R}_{u_2} \cong \mathbf{R}_s$ é avaliado. Os parâmetros utilizados são $M = 8$, $\theta_s = \theta_{u_2} = 36^\circ$, $\theta_{u_1} = -36^\circ$, $\Delta_s = \Delta_u = 3^\circ$

e $\mu_s = \mu_u = 0,01$. A Fig. 6 mostra a curva da SINR para os algoritmos CSG e ICSG e a Fig. 7, os diagramas de radiação correspondentes para o regime permanente.

C. Exemplo 3

Neste exemplo, o caso $\mathbf{R}_{u_2} \cong \mathbf{R}_{u_1} \cong \mathbf{R}_s$ é considerado. Os parâmetros usados são $M = 8$, $\theta_s = 0^\circ$, $\theta_{u_1} = -12^\circ$, $\theta_{u_2} = 12^\circ$,

$\Delta_s = \Delta_u = 3^\circ$ e $\mu_s = \mu_u = 0,05$. A Fig. 8 mostra as curvas da SINR para os algoritmos CSG e ICSG e a Fig. 9, os correspondentes diagramas de radiação em regime permanente. As figuras apresentadas mostram um bom casamento entre simulação numérica e os modelos, validando assim os aspectos teóricos considerados.

Os diagramas de radiação, apresentados nas Figs. 5(a), 7(a) e 9(a), mostram que, durante o comportamento não-balanceado do algoritmo CSG padrão, o TM não recebe potência suficiente da estação de rádio base, indicando que o serviço tem sido interrompido. Por outro lado, as antenas controladas pelo algoritmo ICSG [ver Figs. 5(b), 7(b) e 9(b)] fornecem potência suficiente ao TM em todas as condições de operação consideradas.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi reportado um comportamento indesejado do algoritmo CSG. Tal anomalia surge quando estão combinadas as seguintes situações: um ou mais ângulos de chegada dos sinais interferentes apresentam valores numéricos próximos ao ângulo de chegada do sinal útil e a essa condição tem-se associada uma dispersão pequena do ângulo de chegada dos referidos sinais. Então, baseado no modelo que descreve o comportamento médio dos coeficientes, o comportamento não-balanceado do algoritmo CSG foi explicado e uma versão melhorada do algoritmo CSG (ICSG) foi apresentada.

REFERÊNCIAS

- [1] L. C. Godara, "Cellular Systems," *Handbook in Antennas in Wireless Communications*, L. C. Godara, ed., CRC Press, 2002.
- [2] J. M. Goldberg and J. R. Fonollosa, "Downlink beamforming for spatially distributed sources in cellular mobile communications," *Signal Processing*, vol. 65, no. 2, pp. 181-197, Mar. 1998.
- [3] B. M. Hochwald and T. L. Marzetta, "Adapting a downlink array from uplink measurements," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 49, no. 3, pp. 642-653, Mar. 2001.
- [4] Y.-C. Liang and F. P. S. Chin, "Downlink channel covariance matrix (DCCM) estimation and its applications in wireless DS-CDMA systems," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, no. 2, pp. 222-232, Feb. 2001.
- [5] D. R. Morgan, "Downlink adaptive array algorithms for cellular mobile communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 3, pp. 476-488, Mar. 2003.
- [6] J. E. Kolodziej, O. J. Tobias e R. Seara, "Modelagem estatística do algoritmo CSG aplicada para um arranjo adaptativo de antenas," Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Recife, PE, Set. 2007, pp. 1-6.
- [7] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
- [8] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [9] B. Farhang-Boroujeny, *Adaptive Filters: Theory and Applications*. New York: Wiley, 1998.

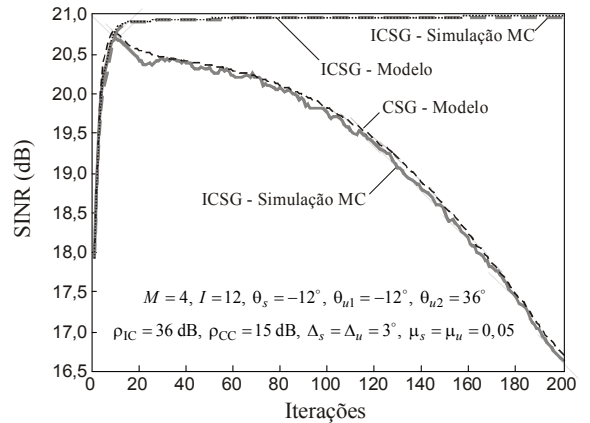
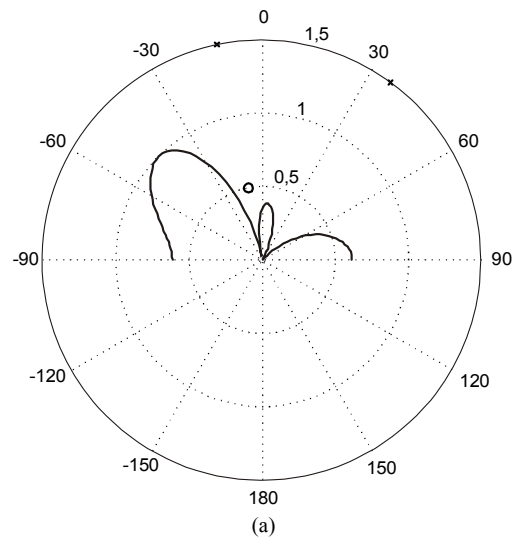


Fig. 4. Exemplo 1. Curva da SINR. Algoritmo CSG: (linhas cinzas) simulações MC; (linhas tracejadas escuras) previsões do modelo. Algoritmo ICSG: (linhas tracejadas cinzas) simulações MC; (linhas pontilhadas escuras) previsões do modelo.

$M = 4$, $I = 12$, $\theta_s = -12^\circ$, $\theta_{u1} = -12^\circ$, $\theta_{u2} = 36^\circ$, $\Delta_s = \Delta_u = 3^\circ$, $\mu_s = \mu_u = 0,05$



$M = 4$, $I = 12$, $\theta_s = -12^\circ$, $\theta_{u1} = -12^\circ$, $\theta_{u2} = 36^\circ$, $\Delta_s = \Delta_u = 3^\circ$, $\mu_s = \mu_u = 0,05$

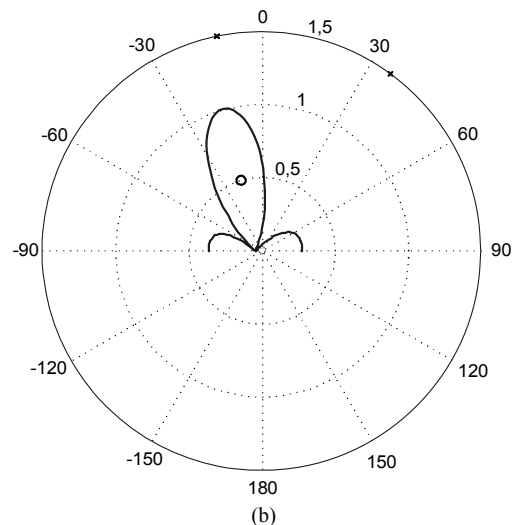


Fig. 5. Exemplo 1. Diagrama de radiação. Terminal móvel da própria célula (o). Interferentes (x). (a) Algoritmo CSG. (b) Algoritmo ICSG.

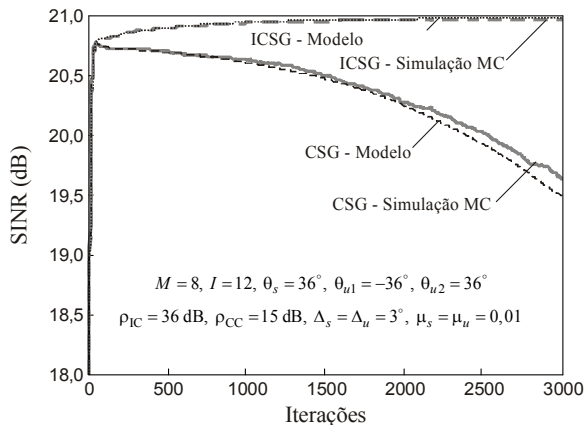


Fig. 6. Exemplo 2. Curvas da SINR. Algoritmo CSG: (linhas cinzas) simulações MC; (linhas tracejadas escuras) modelo. Algoritmo ICSG: (linhas tracejadas cinzas) simulações MC; (linhas pontilhadas escuras) modelo.

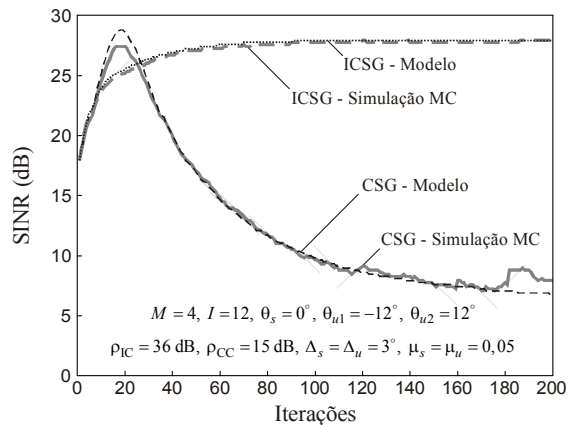
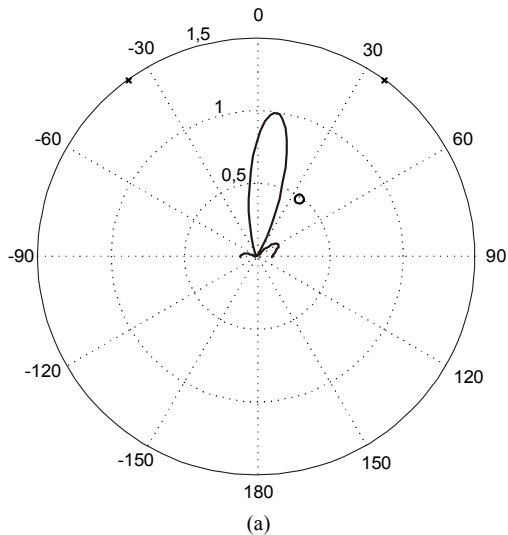


Fig. 8. Exemplo 3. Curvas da SINR. Algoritmo CSG: (linhas cinzas) simulações MC; (linhas tracejadas escuras) modelo. Algoritmo ICSG: (linhas tracejadas cinzas) simulações MC; (linhas pontilhadas escuras) modelo.

$M = 8, I = 12, \theta_s = 36^\circ, \theta_{u1} = -36^\circ, \theta_{u2} = 36^\circ, \Delta_s = \Delta_u = 3^\circ, \mu_s = \mu_u = 0,01$



$M = 8, I = 12, \theta_s = 36^\circ, \theta_{u1} = -36^\circ, \theta_{u2} = 36^\circ, \Delta_s = \Delta_u = 3^\circ, \mu_s = \mu_u = 0,01$

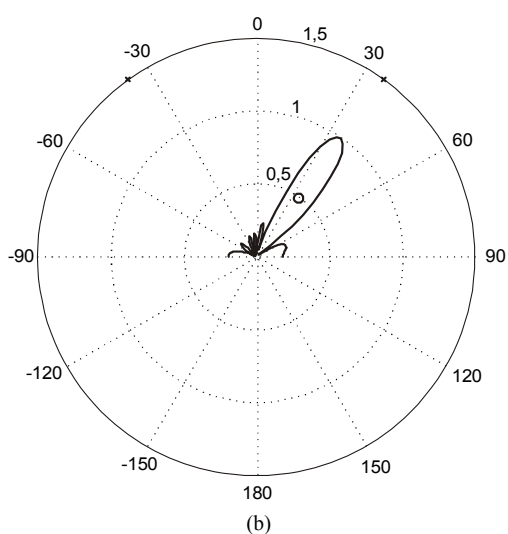
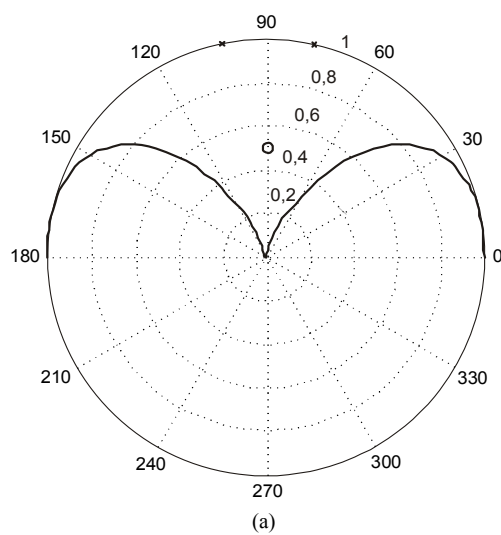


Fig. 7. Exemplo 2. Diagramas de radiação. Terminal móvel da própria célula (o). Interferentes (x). (a) Algoritmo CSG. (b) Algoritmo ICSG.

$M = 4, I = 12, \theta_s = 0^\circ, \theta_{u1} = -12^\circ, \theta_{u2} = 12^\circ, \Delta_s = \Delta_u = 3^\circ, \mu_s = \mu_u = 0,05$



$M = 4, I = 12, \theta_s = 0^\circ, \theta_{u1} = -12^\circ, \theta_{u2} = 12^\circ, \Delta_s = \Delta_u = 3^\circ, \mu_s = \mu_u = 0,05$

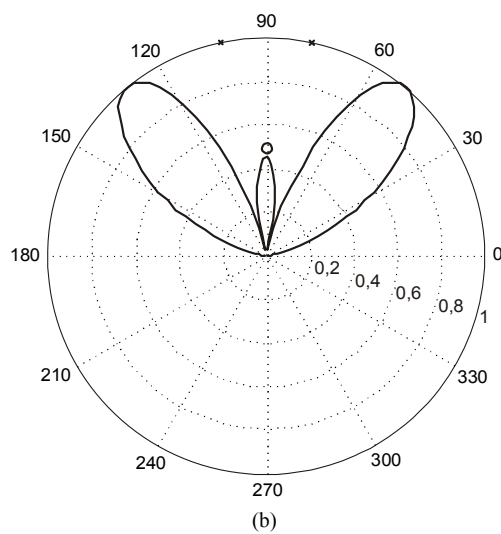


Fig. 9. Exemplo 3. Diagramas de radiação. Terminal móvel da própria célula (o). Interferentes (x). (a) Algoritmo CSG. (b) Algoritmo ICSG.