

A

Normalização dos Passos dos Algoritmos SG em Receptores Lineares CMV

Este Apêndice é dedicado à normalização dos passos dos algoritmos SG que operam com o critério de mínima variância, descritos no Capítulo 5. São considerados dois casos: percurso único e multi-percurso.

A.1

Derivação do Passo Normalizado: Percurso Único

Para desenvolver um passo normalizado para um algoritmo de mínima variância, como o descrito por (5-13), soma-se \mathbf{s}_k a ambos os lados de (5-13) e escreve-se a função custo de mínima variância $J_{MV} = |\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}|^2$ como:

$$J = |(\mathbf{w}_k - \mu_w (\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}) \mathbf{v}_k)^H \mathbf{r}|^2 \quad (\text{A-1})$$

onde $\mathbf{v}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H) \mathbf{r}$. Calculando-se os termos do gradiente de J_{MV} com relação a μ_w e igualando-se os termos a zero, tem-se:

$$\nabla J_{\mu_w} = 2|\mathbf{w}_k^H \mathbf{r} - \mu_w ((\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}) \mathbf{v}_k)^H \mathbf{r}| \times ((-\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}) \mathbf{v}_k)^H \mathbf{r} = 0 \quad (\text{A-2})$$

e a solução é dada por:

$$\mu_w = \frac{1}{\mathbf{r}^H \mathbf{v}_k} = \frac{1}{\mathbf{r}^H (\mathbf{I} - \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H) \mathbf{r}} \quad (\text{A-3})$$

Note que um fator de convergência μ_0 deve ser introduzido de modo que o algoritmo opere com passos adequados, que geralmente são pequenos no caso de técnicas autodidatas para garantir bom desempenho, em ambientes dinâmicos. Desta maneira, tem-se:

$$\mu_w = \frac{\mu_0}{\mathbf{r}^H (\mathbf{I} - \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H) \mathbf{r}} \quad (\text{A-4})$$

A.2

Derivação do Passo Normalizado: Multi-percurso

Para obter um passo normalizado no algoritmo SG de mínima variância para canais com multi-percurso, como o descrito por (5-15), escreve-se a função custo de mínima variância $J_{MV} = |\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}|^2$ da seguinte forma:

$$J = |(\mathbf{\Pi}_k(\mathbf{w}_k - \mu_w \mathbf{r} \mathbf{r}^H \mathbf{w}_k))^H \mathbf{r} + \mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{g})^H \mathbf{r}|^2 \quad (\text{A-5})$$

Calculando-se os termos do gradiente de J_{MV} com respeito a μ_w e igualando-se os termos a zero, tem-se:

$$\nabla J_{\mu_w} = 2|(\mathbf{\Pi}_k \mathbf{w}_k)^H \mathbf{r} - \mu_w (\mathbf{\Pi}_k \mathbf{r} \mathbf{r}^H \mathbf{w}_k)^H \mathbf{r} + (\mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{g})^H \mathbf{r}| \times (-\mathbf{\Pi}_k \mathbf{r} \mathbf{r}^H \mathbf{w}_k)^H \mathbf{r} = 0 \quad (\text{A-6})$$

Substituindo-se $\mathbf{\Pi}_k = \mathbf{I} - (\mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{C}_k^H)$ no primeiro termo de (A-5) e usando-se $\mathbf{C}_k \mathbf{w}_k = \mathbf{g}$ pode-se eliminar o terceiro termo de (A-5) para obter a seguinte solução:

$$\mu_w = \frac{1}{\mathbf{r}^H \mathbf{\Pi}_k \mathbf{r}} \quad (\text{A-7})$$

De modo similar ao caso com percurso único, um fator de convergência μ_0 é introduzido para garantir a estabilidade e um bom desempenho em ambientes não estacionários. Portanto, utiliza-se a seguinte expressão para normalizar o passo:

$$\mu_w = \frac{\mu_0}{\mathbf{r}^H \mathbf{\Pi}_k \mathbf{r}} \quad (\text{A-8})$$

B

Propriedades de Convergência da Técnica CCM

Neste apêndice são examinadas as propriedades de convergência da técnica CCM apresentada no capítulo 5 e também utilizada no projeto de receptores DF no capítulo 6. Uma análise do método CCM e de suas propriedades de convergência é conduzida para o caso do receptor linear, estendendo resultados existentes na literatura sobre a convexidade da função custo CM para sinais complexos e em presença de multi-percurso. Além disso, este estudo fornece as bases teóricas que explicam o bom funcionamento do método e a possibilidade de usá-lo em estrutura DF para proporcionar uma boa condição inicial (melhor do que o projeto CMV) para realizar cancelamento dos usuários associados pela seção realimentada de um receptor DF-CCM.

Considere a expressão alternativa da função custo módulo constante (CM) em (5-67) como $J_{CM} = (E[|z_k|^4] - 2E[|z_k|^2] + 1)$, desprezando-se o índice de tempo (i) por simplicidade, e supondo-se um cenário estacionário, que b_k , $k=1, \dots, K$ sejam variáveis aleatórias complexas estatisticamente independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância unitária, b_k e \mathbf{n} são estatisticamente independentes. Define-se também $\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K A_k b_k \tilde{\mathbf{s}}_k$, $\mathbf{C}_k \mathbf{g} = \tilde{\mathbf{s}}_k$, $\mathbf{Q} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$, $\mathbf{P} = E[\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^H]$, $\mathbf{R} = \mathbf{Q} + \mathbf{P} + \sigma^2 \mathbf{I}$. Considere o usuário 1 como aquele desejado, $\mathbf{w}_1 = \mathbf{w}$ e defina-se $u_k = A_k^* \tilde{\mathbf{s}}_k^H \mathbf{w}$, $\mathbf{u} = \mathbf{A}^H \tilde{\mathbf{S}}^H \mathbf{w} = [u_1 \dots u_K]^T$, onde $\tilde{\mathbf{S}} = [\tilde{\mathbf{s}}_1 \dots \tilde{\mathbf{s}}_K]$, $\mathbf{A} = \text{diag}(A_1 \dots A_K)$ e $\mathbf{b} = [b_1 \dots b_K]^T$. Usando-se a restrição $\mathbf{C}_1^H \mathbf{w} = \nu \hat{\mathbf{g}}$ tem-se para o usuário desejado a condição $u_1 = (A_1^* \tilde{\mathbf{s}}_1^H) \mathbf{w} = A_1^* \mathbf{g} \mathbf{C}_1^H \mathbf{w} = \nu A_1^* \mathbf{g}^H \hat{\mathbf{g}}$. Na ausência de ruído e desprezando-se a IES, a função custo (do usuário 1)

pode ser expressa como:

$$\begin{aligned}
 J_{CM}(\mathbf{w}) &= E[(\mathbf{u}^H \mathbf{b} \mathbf{b}^H \mathbf{u})^2] - 2E[(\mathbf{u}^H \mathbf{b} \mathbf{b}^H \mathbf{u})] + 1 \\
 &= 8 \left(\sum_{k=1}^K u_k u_k^* \right)^2 - 4 \sum_{k=1}^K (u_k u_k^*)^2 - 4 \sum_{k=1}^K u_k u_k^* + 1 \\
 &= 8 \left(D + \sum_{k=2}^K u_k u_k^* \right)^2 - 4D^2 - 4 \sum_{k=2}^K (u_k u_k^*)^2 - 4D - 4 \sum_{k=2}^K (u_k u_k^*) + 1
 \end{aligned} \tag{B-1}$$

onde $D = u_1 u_1^* = \nu^2 |A_1|^2 |\hat{\mathbf{g}}^H \mathbf{g}|^2$. Para examinar as propriedades de convergência do problema de otimização em (5-67), prossegue-se de forma similar a [114]. Sujeito às restrições $\mathbf{C}_1^H \mathbf{w} = \nu \hat{\mathbf{g}}$, tem-se:

$$J_{CM}(\mathbf{w}) = \tilde{J}_{CM}(\bar{\mathbf{u}}) = 8(D + \bar{\mathbf{u}}^H \bar{\mathbf{u}})^2 - 4D^2 - 4 \sum_{k=2}^K (u_k u_k^*)^2 - 4D - 4(\bar{\mathbf{u}}^H \bar{\mathbf{u}}) + 1 \tag{B-2}$$

onde $\bar{\mathbf{u}} = [u_2, \dots, u_K]^T = \mathbf{B} \mathbf{w}$, $\mathbf{B} = \mathbf{A}'^H \tilde{\mathbf{S}}'^H$, $\tilde{\mathbf{S}}' = [\tilde{s}_2 \dots \tilde{s}_K]$ e $\mathbf{A}' = \text{diag}(A_2 \dots A_K)$. Para avaliar a convexidade de $\tilde{J}_{CM}(\cdot)$, calcula-se a Hessiana (\mathbf{H}) usando-se a regra $\mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial \bar{\mathbf{u}}^H} \frac{\partial(\tilde{J}_{CM}(\bar{\mathbf{u}}))}{\partial \bar{\mathbf{u}}}$ que produz:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H} &= \left[16(D - 1/4)\mathbf{I} + 16\bar{\mathbf{u}}^H \bar{\mathbf{u}} \mathbf{I} + 16\bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}^H - 16 \text{diag}(|u_2|^2 \dots |u_K|^2) \right] \\
 &= 16 \left[(D - 1/4)\mathbf{I} + \left(\bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}^H + \text{diag} \left(\sum_{k=3}^K |u_k|^2 \sum_{k=2, k \neq 3}^K |u_k|^2 \dots \sum_{k=3, k \neq K}^K |u_k|^2 \right) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{B-3}$$

Especificamente, \mathbf{H} é positiva definida se $\mathbf{a}^H \mathbf{H} \mathbf{a} > 0$ para todos elementos diferentes de zero em $\mathbf{a} \in \mathbf{C}^{K-1 \times K-1}$ [45]. O segundo, terceiro e quarto termos de (B-3) resultam na matriz positiva definida $16 \left(\bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}^H + \text{diag} \left(\sum_{k=3}^K |u_k|^2 \sum_{k=2, k \neq 3}^K |u_k|^2 \dots \sum_{k=3, k \neq K}^K |u_k|^2 \right) \right)$, onde o primeiro termo fornece a condição $\nu^2 |A_1|^2 |\hat{\mathbf{g}}^H \mathbf{g}|^2 \geq 1/4$ que garante a convexidade de $\tilde{J}_{CM}(\cdot)$ para o caso sem ruído. Como $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{B} \mathbf{w}$ é uma função linear de \mathbf{w} e $\tilde{J}_{CM}(\bar{\mathbf{u}})$ é uma função convexa de $\bar{\mathbf{u}}$, isto implica que $J_{CM}(\mathbf{w}) = \tilde{J}_{CM}(\mathbf{B} \mathbf{w})$ é uma função convexa de \mathbf{w} . Como os pontos críticos da função custo podem ser considerados para pequenos valores de σ^2 uma pequena perturbação do caso em que há ausência de ruído [114], a função custo também é convexa para pequenos valores de σ^2 quando $\nu^2 |A_1|^2 |\hat{\mathbf{g}}^H \mathbf{g}|^2 \geq 1/4$. É interessante notar que, supondo-se estimativas ideais de canal ($|\hat{\mathbf{g}}^H \mathbf{g}| = 1$) e $\nu = 1$, o nosso resultado se reduz a $|A_1|^2 \geq 1/4$, que é o mesmo encontrado em [136]. Para valores maiores de σ^2 , é importante ressaltar que o termo ν pode ser

ajustado de forma a tornar a função custo J_{CM} em (5-67) convexa, como explicado em [114].

C

Normalização dos Passos dos Algoritmos CCM-SG em Receptores Lineares

Este apêndice é sobre a normalização dos passos dos algoritmos SG em estruturas de recepção linear com base na abordagem CCM.

O desenvolvimento de um procedimento de normalização de passo para o algoritmo CCM-SG descrito por (5-70) consiste nas seguintes etapas. Inicialmente, escreve-se a função custo CM como $J_{CM} = (|\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}|^2 - 1)^2$ e substitui-se a recursão dada por (5-70):

$$J_{CM} = (|\mathbf{P}_k(\mathbf{w}_k - \mu_w \mathbf{r} e_k z_k^*)^H \mathbf{r} + (\mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{g})^H \mathbf{r}|^2 - 1)^2 \quad (\text{C-1})$$

onde $z_k = \mathbf{w}_k^H \mathbf{r}$ e $e_k = |z_k|^2 - 1$. Substituindo-se $\mathbf{P}_k = \mathbf{I} - (\mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{C}_k^H)$ no primeiro termo de (C-1) e usando-se o fato de que $\mathbf{C}_k^H \mathbf{w}_k = \mathbf{g}$ pode-se simplificar (C-1) e obter:

$$J_{CM} = (|z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r} - \mu_f e_k z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}|^2 - 1)^2 \quad (\text{C-2})$$

Em seguida, calculando-se o gradiente de J_{CM} com relação a μ_w e igualando-se os termos a zero, tem-se:

$$\nabla J_{\mu_w} = 2(|z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}|^2 - 1) \frac{d}{d\mu_w} |z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}|^2 = 0 \quad (\text{C-3})$$

Examinando-se a expressão acima, torna-se claro que esta minimização leva a quatro soluções possíveis:

$$\begin{aligned} \mu_w^{n.1} = \mu_w^{n.2} &= \frac{1 - \mu_f e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}}, \quad \mu_w^{n.3} = \frac{(|z_k| - 1) - \mu_f |z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}}, \\ \mu_w^{n.4} &= \frac{(|z_k| + 1) - \mu_f |z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \end{aligned} \quad (\text{C-4})$$

Computando-se a segunda derivada de (C-2) verifica-se que esta é positiva para as soluções $\mu_w^{n.3}$ e $\mu_w^{n.4}$, indicando um ponto de mínimo. É importante ressaltar que a escolha de $\mu_w^{n.3}$ ou de $\mu_w^{n.4}$ leva a passos com desempenho e

complexidades equivalentes, de modo que a sua escolha deve ser arbitrada. Desta forma, escolhe-se $\mu_w^{n.4}$ e faz-se as seguintes simplificações:

$$\mu_w = \frac{|z_k| + 1}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} = \frac{|z_k| + 1}{|z_k| (|z_k| - 1)(|z_k| + 1) \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} = \frac{1}{|z_k| (|z_k| - 1) \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \quad (\text{C-5})$$

Em seguida, introduz-se o fator de convergência μ_{0_w} de modo que os algoritmos operem com passos pequenos típicos das técnicas autodidatas para garantir bom desempenho. Portanto, o passo normalizado é dado por

$$\mu_w = \frac{\mu_{0_w}}{|z_k| (|z_k| - 1) \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \quad (\text{C-6})$$

D

Normalização dos Passos dos Algoritmos SG em Receptores DF

Este apêndice trata do procedimento de normalização dos passos dos algoritmos SG em estruturas com decisão realimentada, usando os critérios CCM e CMV.

D.1

Derivação do Passo Normalizado: Caso CCM-SG

Para obter os passos normalizados para os algoritmos em (6-22) e (6-23), escreve-se a função custo CM $J_{CM} = (|\mathbf{w}_k^H \mathbf{r} - \mathbf{f}_k^H \hat{\mathbf{b}}|^2 - 1)^2$ como uma função de (6-22) e (6-23):

$$J_{CM} = (|\mathbf{P}_k(\mathbf{w}_k - \mu_w \mathbf{r} e_k z_k^*)^H \mathbf{r} - \mathbf{f}_k^H \hat{\mathbf{b}} - \mu_f e_k^* z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}} + (\mathbf{C}_k (\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{h}_k)^H \mathbf{r}|^2 - 1)^2 \quad (\text{D-1})$$

Substituindo-se $\mathbf{P}_k = \mathbf{I} - (\mathbf{C}_k (\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{C}_k^H)$ no primeiro termo de (D-1) e usando-se $\mathbf{C}_k^H \mathbf{w}_k = \mathbf{h}_k$ pode-se simplificar (D-1):

$$J_{CM} = (|z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r} - \mu_f e_k z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}|^2 - 1)^2 \quad (\text{D-2})$$

Em seguida, calcula-se o gradiente J_{CM} com relação a μ_w e iguala-se os termos a zero, resultando em:

$$\nabla J_{\mu_w} = 2(|z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r} - \mu_f e_k z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}|^2 - 1) \frac{d}{d\mu_w} |z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r} - \mu_f e_k z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}|^2 = 0 \quad (\text{D-3})$$

Observando-se a expressão acima, conclui-se que esta minimização tem quatro soluções possíveis, de modo similar ao Apêndice C:

$$\mu_w^{n.1} = \mu_w^{n.2} = \frac{1 - \mu_f e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}}, \quad \mu_w^{n.3} = \frac{(|z_k| - 1) - \mu_f |z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}},$$

$$\mu_w^{n.4} = \frac{(|z_k| + 1) - \mu_f |z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \quad (\text{D-4})$$

Neste ponto usa-se o resultado para o caso linear descrita no Apêndice C, onde a segunda derivada é positiva para $\mu_w^{n.3}$ e $\mu_w^{n.4}$, indicando um ponto de mínimo. Desta forma, escolhe-se $\mu_w^{n.4}$. Em seguida, calcula-se o gradiente J_{CM} com relação a μ_f e iguala-se os termos a zero, resultando em:

$$\nabla J_{\mu_f} = 2(|z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r} - \mu_f e_k z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}|^2 - 1) \frac{d}{d\mu_f} |z_k - \mu_w e_k z_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r} - \mu_f e_k z_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}|^2 = 0 \quad (\text{D-5})$$

É importante destacar que de acordo com a expressão acima, a solução de μ_f é análoga a μ_w e resulta nas mesmas relações. Então, adota-se $\mu_w = \frac{(|z_k|+1) - \mu_f |z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}}$ e introduz-se os fatores de convergência μ_{0_w} e μ_{0_f} de modo que os algoritmos operem com passos adequados para assegurar bom desempenho. Desta maneira, os passos normalizados são descritos por:

$$\mu_w = \mu_{0_w} \frac{(|z_k| + 1) - \mu_f |z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}}{|z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \quad (\text{D-6})$$

e

$$\mu_f = \mu_{0_f} \frac{(|z_k| + 1) - \mu_w |z_k| e_k \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}}{|z_k| e_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}} \quad (\text{D-7})$$

D.2

Derivação do Passo Normalizado: Caso CMV-SG

Para derivar o passo normalizado para o algoritmo SG em (6-24) e (6-25), escreve-se a função custo de mínima variância $J = |\mathbf{w}_k^H \mathbf{r}|^2$ como uma função de (6-24) e (6-25):

$$J_{MV} = |\mathbf{P}_k (\mathbf{w}_k - \mu_w \mathbf{r} x_k^*)^H \mathbf{r} - \mathbf{f}_k^H \hat{\mathbf{b}} - \mu_f x_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}} + \mathbf{C}_k (\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{h}_k)^H \mathbf{r}|^2 \quad (\text{D-8})$$

Calculando-se o gradiente de J_{MV} com respeito a μ_w e igualando-se a zero, obtém-se:

$$\nabla J_{\mu_w} = 2|\mathbf{P}_k (\mathbf{w}_k - \mu_w \mathbf{r} x_k^*)^H \mathbf{r} - \mathbf{f}_k^H \hat{\mathbf{b}} - \mu_f x_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}} + \mathbf{C}_k (\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{h}_k)^H \mathbf{r}| \times (-\mathbf{P}_k \mathbf{r} x_k^*)^H \mathbf{r} = 0 \quad (\text{D-9})$$

Substituindo-se $\mathbf{P}_k = \mathbf{I} - (\mathbf{C}_k (\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{C}_k^H)$ no primeiro termo de (D-9), usando-se $\mathbf{C}_k \mathbf{w}_k = \mathbf{h}_k$ pode-se eliminar o terceiro termo de (D-9) para obter a solução:

$$\mu_w = \frac{x_k (1 - \mu_f \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}})}{x_k (\mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r})} = \frac{(1 - \mu_f \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}})}{\mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \quad (\text{D-10})$$

É introduzido um fator de convergência μ_{0_w} de modo que o algoritmo possa operar com passos adequados. Desta forma, tem-se:

$$\mu_w = \mu_{0_w} \frac{(1 - \mu_f \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}})}{\mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r}} \quad (\text{D-11})$$

Em seguida, calculando-se o gradiente de J_{MV} com relação a μ_f e igualando-se os termos a zero tem-se:

$$\nabla J_{\mu_f} = 2|\mathbf{P}_k(\mathbf{w}_k - \mu_w \mathbf{r} x_k^*)^H \mathbf{r} - \mathbf{f}_k^H \hat{\mathbf{b}} - \mu_f x_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}} + \mathbf{C}_k (\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{h}_k)^H \mathbf{r}| \times (-x_k \hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}})^H \mathbf{r} = 0 \quad (\text{D-12})$$

onde percebe-se que as condições são as mesmas obtidas para μ_w . Desta forma, procede-se de maneira análoga à obtenção do passo μ_w para obter o passo μ_f :

$$\mu_f = \frac{(1 - \mu_w \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r})}{\hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}} \quad (\text{D-13})$$

Novamente, aplica-se um fator de convergência μ_{0_f} para garantir valores adequados para o passo de forma a garantir bom desempenho do algoritmo. O passo normalizado para o algoritmo SG da seção realimentada é expresso por:

$$\mu_f = \mu_{0_f} \frac{(1 - \mu_w \mathbf{r}^H \mathbf{P}_k \mathbf{r})}{\hat{\mathbf{b}}^H \hat{\mathbf{b}}} \quad (\text{D-14})$$

E

Normalização dos Passos dos Algoritmos SG em Receptores Lineares Interpolados

Para obter passos normalizados nos algoritmos SG de mínima variância para receptores lineares interpolados e canais com multi-percurso, como o descrito por (7-28) e (7-29), escreve-se a função custo de mínima variância $J_{MV} = |\mathbf{w}_k^H \bar{\mathbf{r}}_k|^2$ da seguinte forma:

$$J = |(\mathbf{P}_k(\mathbf{w}_k - \mu \bar{\mathbf{r}}_k \bar{\mathbf{r}}_k^H \mathbf{w}_k))^H \bar{\mathbf{r}}_k + \mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{g})^H \bar{\mathbf{r}}_k|^2 \quad (\text{E-1})$$

Calculando-se o gradiente de J_{MV} com respeito a μ e igualando-se a zero, tem-se:

$$\nabla J_\mu = 2|(\mathbf{P}_k \mathbf{w}_k)^H \bar{\mathbf{r}}_k - \mu(\mathbf{P}_k \bar{\mathbf{r}}_k \bar{\mathbf{r}}_k^H \mathbf{w}_k)^H \bar{\mathbf{r}}_k + (\mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{g})^H \bar{\mathbf{r}}_k| \times (-\mathbf{P}_k \bar{\mathbf{r}}_k \bar{\mathbf{r}}_k^H \mathbf{w}_k)^H \bar{\mathbf{r}}_k = 0 \quad (\text{E-2})$$

Substituindo-se $\mathbf{P}_k = \mathbf{I} - \mathbf{D}\mathbf{C}_k(\mathbf{C}_k^H \mathbf{D}^H \mathbf{D}\mathbf{C}_k)^{-1} \mathbf{C}_k^H \mathbf{D}^H$ no primeiro termo de (E-2) e usando-se $\mathbf{C}_k \mathbf{w}_k = \mathbf{g}$ pode-se eliminar o terceiro termo de (E-2) para obter a seguinte solução:

$$\mu = \frac{1}{\bar{\mathbf{r}}_k^H \mathbf{P}_k \bar{\mathbf{r}}_k} \quad (\text{E-3})$$

De modo similar ao caso com percurso único, um fator de convergência μ_0 é introduzido para garantir a estabilidade e um bom desempenho em ambientes não estacionários. Portanto, utiliza-se a seguinte expressão para normalizar o passo do algoritmo que ajusta o receptor de posto reduzido:

$$\mu = \frac{\mu_0}{\bar{\mathbf{r}}_k^H \mathbf{P}_k \bar{\mathbf{r}}_k} \quad (\text{E-4})$$

Em seguida, para normalizar o algoritmo de estimação SG do interpolador, escreve-se a função custo de mínima variância $J_{MV} = |\mathbf{v}_k^H \mathbf{u}_k|^2$ da seguinte forma:

$$J = |(\mathbf{v}_k - \eta x_k^* \mathbf{u}_k)^H \mathbf{u}_k|^2 = |\mathbf{v}_k^H \mathbf{u}_k - \eta x_k^* \mathbf{u}_k^H \mathbf{u}_k|^2 \quad (\text{E-5})$$

onde $x_k = \mathbf{v}^H \mathbf{u}_k$. Calculando-se o gradiente de J_{MV} com respeito a η e igualando-se a zero, tem-se:

$$\nabla J_{\mu} = 2|(\mathbf{v}_k - \eta x_k^* \mathbf{u}_k)^H \mathbf{u}_k| \times \mathbf{u}_k (\mathbf{I} - \eta \mathbf{u}_k)^H \mathbf{u}_k = 0 \quad (\text{E-6})$$

Examinando-se (E-6), conclui-se que o passo do algoritmo SG que ajusta o interpolador é dado por:

$$\eta = \frac{\eta_0}{\mathbf{u}_k^H \mathbf{u}_k} \quad (\text{E-7})$$

F

Propriedades de Convergência do Método Iterativo com Filtros Interpolados e Interpoladores Variantes no Tempo

Nesta parte analisa-se e discute-se a convergência global do método e suas propriedades. São considerados os critérios de projeto MMSE e CMV.

F.1

Projeto do Receptor Interpolado MMSE

Considere o caso do receptor supervisionado e as expressões do MSE associado em (7-8) e (7-9), $J_{MSE}(\mathbf{v}_k, \mathbf{f}(\mathbf{v}_k)) = J(\mathbf{v}_k) = \sigma_{b_k}^2 - \bar{\mathbf{p}}_k^H(i) \bar{\mathbf{R}}_k^{-1}(i) \bar{\mathbf{p}}_k(i)$ e $J_{MSE}(\mathbf{g}(\mathbf{w}_k), \mathbf{w}_k) = \sigma_{b_k}^2 - \bar{\mathbf{p}}_{u_k}^H(i) \bar{\mathbf{R}}_{u_k}^{-1}(i) \bar{\mathbf{p}}_{u_k}(i)$, respectivamente, onde $\sigma_{b_k}^2 = E[|b_k(i)|^2]$. Note que pontos de mínimo global de $J_{MSE}(\mathbf{w}_k(i), \mathbf{v}_k(i)) = E[|b_k(i) - \mathbf{v}_k^H(i) \mathfrak{R}(i) \mathbf{w}_k^*(i)|^2]$ podem ser obtidos por $\mathbf{v}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{v}_k} J(\mathbf{v}_k)$ e $\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{f}(\mathbf{v}_{opt})$ ou $\mathbf{w}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{w}_k} J_{MSE}(\mathbf{g}(\mathbf{w}_k), \mathbf{w}_k)$ e $\mathbf{v}_{opt} = \mathbf{g}(\mathbf{w}_{opt})$. Em um ponto de mínimo $J_{MSE}(\mathbf{v}_k, \mathbf{f}(\mathbf{v}_k))$ é igual a $J_{MSE}(\mathbf{g}(\mathbf{w}_k), \mathbf{w}_k)$ e o MMSE para a estrutura proposta é alcançado. Note também que como $J(\mathbf{v}_k) = J(t\mathbf{v}_k)$, para todo $t \neq 0$, então se \mathbf{v}_k^* é um ponto de mínimo global de $J(\mathbf{v}_k)$ então $t\mathbf{v}_k^*$ é também um ponto de mínimo global. Então, pontos de mínimo global (filtros interpoladores ótimos) podem ser obtidos por $\mathbf{v}_k^* = \arg \min_{\|\mathbf{v}_k\|=1} J(\mathbf{v}_k)$. Como a existência de pelo menos um ponto de mínimo global de $J(\mathbf{v}_k)$ para $\|\mathbf{v}_k\| = 1$ é garantida pelo teorema de Weierstrass [167], então a existência de (infinitos) pontos de mínimo global também é garantida para a função custo em (7-5).

No contexto de convergência global, uma condição suficiente mas não necessária é a convexidade, que é verificada quando a matriz Hessiana é positiva semi-definida, isto é $\mathbf{a}^H \mathbf{H} \mathbf{a} \geq 0$, para qualquer vetor \mathbf{a} . Primeiramente, considere a minimização de $J_{MSE}(\mathbf{w}_k(i), \mathbf{v}_k(i)) = E[|b_k(i) - \mathbf{v}_k^H(i) \mathfrak{R}(i) \mathbf{w}_k^*(i)|^2]$ com interpoladores fixos. Esta otimização leva à seguinte Hessiana $\mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{w}_k^H} \left(\frac{\partial J_{MSE}(\cdot)}{\partial \mathbf{w}_k} \right) = E[\mathbf{r}_k(i) \mathbf{r}_k^H(i)] = \mathbf{R}_k(i)$, que é positiva semi-definida e garante a convexidade da função custo para o caso de interpo-

ladores fixos. Considere agora a otimização conjunta do interpolador \mathbf{v}_k e do receptor \mathbf{w}_k através de uma função custo equivalente a (7-5):

$$\tilde{J}_{MSE}(\mathbf{z}) = E[|b - \mathbf{z}_k^H \mathbf{B} \mathbf{z}_k|^2] \quad (\text{F-1})$$

onde $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \Re & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ é uma matriz de dimensão $(N_I + N/L) \times (N_I + N/L)$,

a matriz Hessiana (\mathbf{H}) com relação a $\mathbf{z}_k = [\mathbf{w}_k^T \ \mathbf{v}_k^T]^T$ é $\mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}_k^H} \frac{\partial (\tilde{J}_{MSE}(\cdot))}{\partial \mathbf{z}_k} = E[(\mathbf{z}_k^H \mathbf{B} \mathbf{z}_k - b_k) \mathbf{B}^H] + E[(\mathbf{z}_k^H \mathbf{B}^H \mathbf{z}_k - b_k^*) \mathbf{B}] + E[\mathbf{B} \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}^H] + E[\mathbf{B}^H \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}]$. Examinando-se \mathbf{H} , nota-se que o terceiro e o quarto termos produzem matrizes positivas definidas ($\mathbf{a}^H E[\mathbf{B} \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}^H] \mathbf{a} \geq 0$ e $\mathbf{a}^H E[\mathbf{B}^H \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}] \mathbf{a} \geq 0$, $\mathbf{z}_k \neq \mathbf{0}$) enquanto o primeiro e o segundo termos correspondem a matrizes indefinidas. Deste modo, a função custo não pode ser classificada como convexa (ou o contrário). Entretanto, para um algoritmo de busca do tipo gradiente, a existência de vários pontos de mínimo global é uma propriedade desejável da função custo desde que a posição dos mínimos globais não resulte em uma oscilação indesejável e esta função não apresente pontos de mínimo local, ou seja, todo ponto de mínimo local é um ponto de mínimo global (a convexidade é suficiente, mas não é uma condição necessária para que esta propriedade seja válida) e conjectura-se que o problema em (F-1) tem esta propriedade. Para dar suporte a esta conjectura, foram conduzidos os seguintes estudos:

- ▷ Considere o caso escalar da função em (F-1), que é definida por $f(w, v) = (b - w r v)^2 = b^2 - 2b w r v + (w \Re v)^2$, onde r é uma constante. Escolhendo-se v (o interpolador "escalar") fixo, fica evidente que a função resultante $f(w, v) = (b - w c)^2$, onde c é uma constante, é uma função convexa, enquanto que para um interpolador variante no tempo as curvas mostradas em Figura F.1, indicam que a função não é mais convexa mas ela também não exhibe mínimos locais.
- ▷ Levando-se em consideração o fato de que para filtros interpoladores pequenos ($N_I \leq 3$), \mathbf{v}_k pode ser expresso em coordenadas esféricas e uma superfície de erro pode ser construída. Especificamente, o vetor de parâmetros do interpolador \mathbf{v}_k pode ser expresso por $\mathbf{v}_k = r \times [\cos(\theta) \times \cos(\phi) \ \cos(\theta) \times \sin(\phi) \ \sin(\theta)]^T$, onde r é o raio, θ e ϕ variam de $-\pi/2$ a $\pi/2$ e $-\pi$ a π , respectivamente, e (7-8) é descrita para vários cenários e condições (E_b/N_0 , canais, etc). As curvas da superfície de desempenho de erro de $J(\mathbf{v}_k)$, mostradas na Figura F.2, revelam que $J(\mathbf{v}_k)$ tem um valor de mínimo global (como deveria) mas não exhibe mínimo local, o que implica que (F-1) não tem mínimos

loais. É importante destacar que se a função custo em (7-5) tivesse um ponto de mínimo local então $J(\mathbf{v}_k)$ em (7-8) deveria também exibir um ponto de mínimo local ainda que a recíproca não seja necessariamente verdadeira: um ponto de mínimo local de $J(\mathbf{v}_k)$ pode corresponder a um ponto de sela de $J_{MSE}(\mathbf{v}_k, \mathbf{w}_k)$, se este existir.

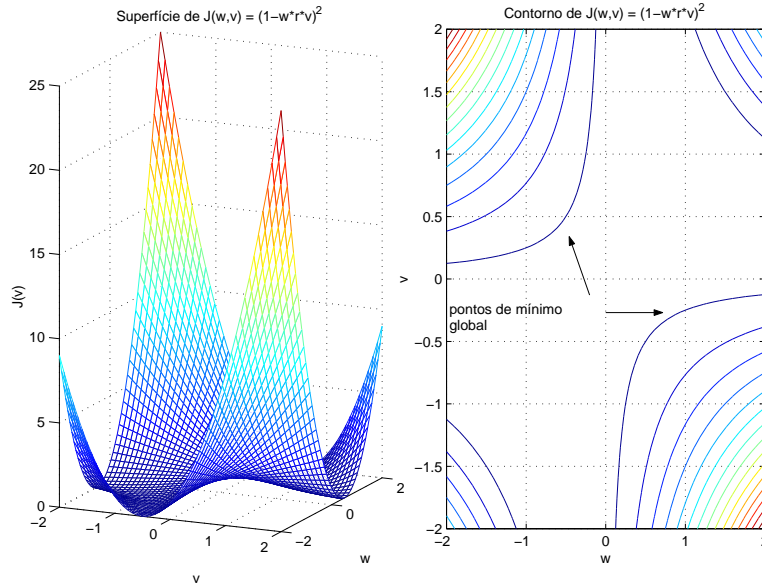


Figura F.1: (a) Superfície de Desempenho de Erro da função $f(v, w) = (1 - w * r * v)^2$ (b) Curvas de contorno mostrando que a função não exibe mínimos locais e possui múltiplos mínimos globais.

- ▷ Uma característica importante que advoga a favor da não existência de mínimos locais é que o algoritmo sempre convergem para o mesmo valor de mínimo, para um dado experimento, independentemente de qualquer valor inicial para o interpolador (exceto para $\mathbf{v}(0) = [0 \dots 0]^T$ que elimina o sinal) para uma ampla gama de valores de E_b/N_0 e canais.

F.2

Projeto do Receptor Interpolado CMV

Para o caso autodata, considere a minimização de $J_{MV}(\mathbf{w}_k(i), \mathbf{v}_k(i)) = E[|\mathbf{v}_k^H(i)\mathfrak{R}(i)\mathbf{w}_k^*(i)|^2]$ com interpoladores fixos sujeita a $\mathbf{C}_k^H \mathbf{D}^H \mathbf{w}_k(i) = \mathbf{g}(i)$ e $\|\mathbf{v}_k(i)\| = 1$. Note que a convergência global do método CMV foi estabelecida por Xu e Tsatsanis em [86] e aqui trata-se um problema similar com interpoladores fixos. Esta otimização leva à seguinte matriz Hessiana

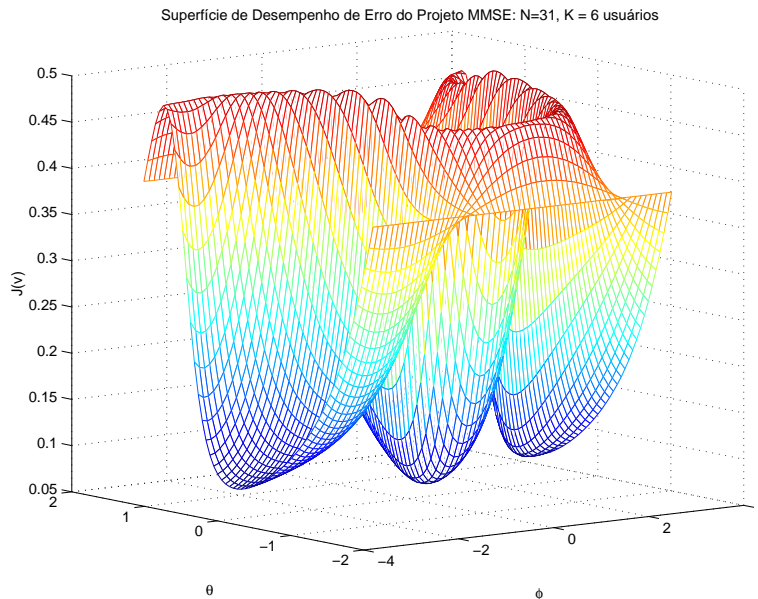


Figura F.2: Superfície de Desempenho de Erro do Projeto dos Receptores Interpolados MMSE com $E_b/N_0 = 15dB$.

$\mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{w}_k^H} \frac{\partial (J_{MV}(\cdot))}{\partial \mathbf{w}_k} = E[\mathbf{r}_k(i)\mathbf{r}_k^H(i)] = \mathbf{R}_k(i)$, que é positiva definida e assegura a convexidade da função custo para o caso de interpoladores fixos.

Considere agora a otimização conjunta do interpolador \mathbf{v}_k e do receptor com posto reduzido \mathbf{w}_k através de uma função custo equivalente a (7-10):

$$\tilde{J}_{MV}(\mathbf{z}) = E[|\mathbf{z}_k^H \mathbf{B} \mathbf{z}_k|^2] \quad (\text{F-2})$$

sujeita a $\mathbf{C}_k^H \mathbf{D}^H \mathbf{w}_k(i) = \mathbf{g}(i)$ e $\|\mathbf{v}_k(i)\| = 1$, onde $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathfrak{R} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ é uma matriz de dimensão $(N_I + N/L) \times (N_I + N/L)$, a Hessiana (\mathbf{H}) com relação a $\mathbf{z}_k = [\mathbf{w}_k^T \ \mathbf{v}_k^T]^T$ é $\mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}_k^H} \frac{\partial (\tilde{J}_{MSE}(\cdot))}{\partial \mathbf{z}_k} = E[\mathbf{z}_k^H \mathbf{B} \mathbf{z}_k \mathbf{B}^H] + E[\mathbf{z}_k^H \mathbf{B}^H \mathbf{z}_k \mathbf{B}] + E[\mathbf{B} \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}^H] + E[\mathbf{B}^H \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}]$. Examinando-se \mathbf{H} nota-se que, como ocorre para o caso MMSE, o terceiro e quarto termos produzem matrizes positivas semi-definidas ($\mathbf{a}^H E[\mathbf{B} \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}^H] \mathbf{a} \geq 0$ e $\mathbf{a}^H E[\mathbf{B}^H \mathbf{z}_k \mathbf{z}_k^H \mathbf{B}] \mathbf{a} \geq 0, \mathbf{z}_k \neq \mathbf{0}$), enquanto o primeiro e segundo termos geram matrizes indefinidas. Desta forma, a função custo não pode ser classificada como convexa (ou não convexa), ainda que conjectura-se que esta função não exiba mínimos locais. Então, segue-se o procedimento empreendido para o caso MMSE para estudar as superfícies produzidas pelo problema em (F-2). Foram conduzidos os seguintes estudos:

- A superfície de desempenho do erro de $J_{MV}(\mathbf{f}(\mathbf{v}_k), \mathbf{v}_k)$ em (7-15) foi construída usando-se coordenadas esféricas de modo similar ao caso MMSE, como ilustrado na Figura F.3, revelando que $J_{MV}(\mathbf{f}(\mathbf{v}_k), \mathbf{v}_k)$ tem um valor de mínimo global (como deveria) mas não exibe mínimos locais, o que implica que (F-2) também não possui mínimos locais. Note que se a função custo em (F-2) tivesse um ponto de mínimo local então $J_{MV}(\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k)$ em (7-15) deveria também exibir um ponto de mínimo local ainda que a recíproca não seja necessariamente verdadeira, porque um ponto de mínimo local de $J_{MV}(\mathbf{v}_k)$ pode corresponder a um ponto de sela de $J_{MV}(\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k)$, caso exista.

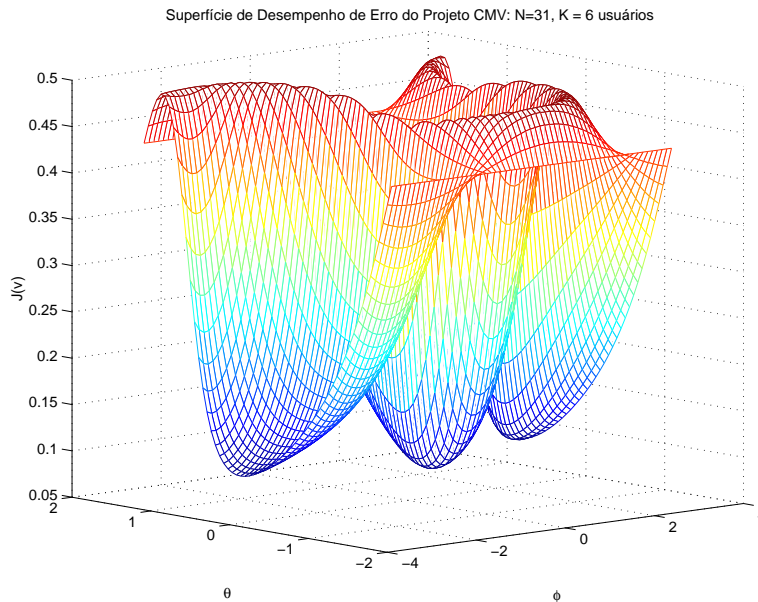


Figura F.3: Superfície de Desempenho de Erro do Projeto dos Receptores Interpolados CMV com $E_b/N_0 = 15dB$.

- ▷ Uma outra propriedade fundamental que aponta para a não existência de mínimos locais para algoritmos às cegas é que estes sempre converge para o mesmo valor de mínimo, para um dado experimento, independentemente do valor inicial do interpolador (exceto para $\mathbf{v}(0) = [0 \dots 0]^T$ que elimina o sinal) para uma grande variedade de valores de E_b/N_0 e canais.

Bibliografia

- [1] J.G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd Ed., New York: McGraw-Hill, 1995.
- [2] S. Verdú, *Multiuser Detection*, Cambridge, 1998.
- [3] M. L. Honig e H. V. Poor, "Adaptive interference suppression," em *Wireless Communications: Signal Processing Perspectives*, H. V. Poor e G. W. Wornell, Eds. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998, cap. 2, pp. 64-128.
- [4] P. van Rooyen, M. Lötter e D. van Wyk, *Space-Time Processing for CDMA Mobile Communications*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [5] S. Kondo e L. B. Milstein, "Performance of Multicarrier DS CDMA Systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, no. 2, Fevereiro, 1996.
- [6] L. B. Milstein, "Wideband Code Division Multiple Access," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 8, Agosto, 2000.
- [7] "Physical Layer Standard for CDMA2000 Spread Spectrum Systems (Release C)," Telecommunications Industry Association, TIA/EIA/IS- 2002.2-C, Maio, 2002.
- [8] "Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access (Release 4)," 3rd Generation Partnership Project, 3GPP TS 25.2- Series, Technical Specification, Março, 2001.
- [9] S. Moshavi, "Multi-User Detection for DS-CDMA Communications," *IEEE Communications Magazine*, pp. 124-135, Outubro, 1996.
- [10] S. Verdú, "Minimum Probability of Error for Asynchronous Gaussian Multiple-Access Channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.IT-32, no. 1, pp. 85-96, Janeiro, 1986.
- [11] R. Lupas e S. Verdú, "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 35, pp. 123-136, Janeiro de 1989.

- [12] M. Abdulrahman, A. U.K. Sheikh e D. D. Falconer, "Decision Feedback Equalization for CDMA in Indoor Wireless Communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 12, no. 4, May, 1994.
- [13] P. Patel e J. Holtzman, "Analysis of a Simple Successive Interference Cancellation Scheme in a DS/CDMA Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, n. 5, Junho de 1994.
- [14] M. K. Varanasi e B. Aazhang, "Multistage detection in asynchronous CDMA communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, no. 4, pp. 509-19, Abril de 1990.
- [15] Marcelo Freitas Marçal, "Recepção Multiusuário com Detecção por Grupos em Sistemas com Múltiplo Acesso CDMA," Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, 2002.
- [16] Fabian David Backx, Detecção Multiusuário Ótima por Grupos em Sistemas DS/CDMA M-PSK com Codificação Convolutional, Dissertação de Mestrado, PUC- RIO, 2004.
- [17] B. Aazhang, B. P. Paris e G. C. Orsak, "Neural Networks for Multiuser Detection in Code-Division-Multiple-Access Communications", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, No. 7, Julho, 1992.
- [18] U. Mitra e H. V. Poor, "Neural Network Techniques for Adaptive Multiuser Demodulation", *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, Vol. 12, No. 9, Dezembro, 1994.
- [19] W. G. Teich, M. Seidl e M. Nold, "Multiuser Detection for DS-CDMA Communication Systems based on Recurrent Neural Networks Structures", *Proc. IEEE ISSSTA '98*, 2-4 de Setembro, Sun City, África do Sul, pp. 863-867, 1998.
- [20] E. Telatar, "Capacity of multiantenna Gaussian channels," AT&T Bell Laboratories, Tech. Memo., Junho de 1995.
- [21] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas," *Bell Labs Technical Journal*, pp. 41-59, 1996.
- [22] A. Paulraj e C. B. Papadias, "Space-time processing for wireless communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 14, pp. 49-83, Novembro de 1997.
- [23] G. J. Foschini e M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, pp. 311-335, Março de 1998.

- [24] G. Raleigh e J. M. Cioffi, "Spatial-temporal coding for wireless communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, pp. 357-366, 1998.
- [25] F. Adachi, M. Sawahashi, e H. Suda, "Wideband DS-CDMA for next-generation mobile communications systems," *IEEE Communications Magazine*, pp. 56-69, Setembro de 1998.
- [26] J.C. Liberti e T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall: Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [27] S. Bashyam e B. Aazhang, "Multiuser channel estimation and tracking for long-code CDMA Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 7, pp. 1081-1090, Julho de 2002.
- [28] S. Buzzi e H. V. Poor, "Channel estimation and multiuser detection in long-code DS-CDMA Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 8, pp. 1476-1487, Agosto de 2001.
- [29] A. Weiss e B. Friedlander, "Channel Estimation for DS-CDMA Downlink with Aperiodic Spreading Codes", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 10, pp. 1561-1569, Outubro, 1999.
- [30] Z. Xu, "Low Complexity Multiuser Channel Estimation with Aperiodic Spreading Codes", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 11, pp. 2813-2822, Novembro, 2001.
- [31] P. Liu e Z. Xu, "Joint Performance Study of Channel Estimation and Multiuser Detection for Uplink Long-Code CDMA Systems", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2004:1, pp. 98-112.
- [32] L. Li, A. M. Tulino e S. Verdú, "Design of Reduced-Rank MMSE Multiuser Detectors Using Random Matrix Methods," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 50, No. 6, Junho de 2004.
- [33] T. Ojanpera e R. Prasad, "An overview of air interface multiple access for IMT-2000/UMTS," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, pp. 82-95, Setembro, 1998.
- [34] P. Taaghoul, B. G. Evans, R. De Gaudenzi, G. Gallinaro, J. H. Lee, e C. G. Kang, "Satellite UMTS/IMT2000 W-CDMA air interfaces," *IEEE Communications Magazine*, vol. 37, pp. 116-126, Setembro, 1999.
- [35] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd Edition, Prentice-Hall, 1999.

- [36] S. U. H. Qureshi, "Adaptive equalization", *Proceedings of IEEE*, vol. 73, pp. 1349-1387, 1985.
- [37] S. Chen, B. Mulgrew e S. McLaughlin, "Adaptive Bayesian equaliser with decision feedback", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 9, pp. 2918-2927, Setembro, 1993.
- [38] G. J. Gibson, S. Siu, e C. F. Cowan, "The application of nonlinear structures to the reconstruction of binary signals", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 39, no. 8, pp. 1877-1884, Agosto, 1991.
- [39] B. Mulgrew, "Applying radial basis functions", *IEEE Signal Processing Magazine*, Março, 1996.
- [40] I. Cha e S. A. Kassam, "Channel equalization using adaptive complex radial basis function networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 122-131, Janeiro, 1995.
- [41] G. Kechriotis, E. Zervas e E. S. Manolakos, "Using Recurrent Neural Networks for Adaptive Communication Channel Equalization", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, no. 2, pp. 267-278, Março, 1994.
- [42] M. J. Bradley e P. Mars, "Application of Recurrent Neural Networks to Communication Channel Equalization", *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, 1995.
- [43] S. Ong, C. You, S. Choi e D. Hong, "A decision feedback recurrent neural equalizer as an infinite impulse response filter", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, pp. 2851-2858, Novembro, 1997.
- [44] A. Zerguine, A. Shafi e M. Bettayeb, "Multilayer perceptron-based DFE with lattice structure", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 12, pp. 532-545, Maio, 2001.
- [45] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4rd edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2002.
- [46] P. S. R. Diniz, *Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementations*, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 2002.
- [47] R. J. Williams e D. Zipser, "A learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks", *Neural Computation*, vol. 1, pp. 270-280, 1989.
- [48] G. Woodward, R. Ratasuk, M. L. Honig e P. Rapajic, "Multistage decision-feedback detection for DS-CDMA," in *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Vancouver, BC, Canada, Junho, 1999.

- [49] R. C. de Lamare e R. Sampaio-Neto, "Analysis of Adaptive Multiuser Receivers for DS-CDMA using Recurrent Neural Networks", *Proc. SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium*, Setembro, 2002.
- [50] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Adaptive Decision Feedback Multiuser Detectors with Recurrent Neural Networks for DS-CDMA in Fading Channels", *Proceedings IEEE International Conference in Telecommunications (ICT)*, Fortaleza, Agosto, 2004.
- [51] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Adaptive Decision Feedback Multiuser Detectors with Recurrent Neural Networks for DS-CDMA in Fading Channels", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3124, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 134-141, Agosto, 2004.
- [52] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [53] Z. Xie, R. T. Short e C. K. Rushforth, "A family of suboptimum detectors for coherent multi-user communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 8, pp.683-690, Maio, 1990.
- [54] U. Madhow e M. L. Honig, "MMSE interference suppression for direct-sequence spread-spectrum CDMA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 42, no. 12, pp. 3178-88, Dezembro, 1994.
- [55] S. L. Miller, "An adaptive DS-CDMA Receiver for Multiuser Interference Rejection," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 1746-55, Fevereiro/Março/Abril, 1995.
- [56] M. R. Aaron e D. W. Tufts, "Intersymbol interference and error probability," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-12, pp 26-34, Janeiro, 1966.
- [57] E. Shamash e K. Yao, "On the structure and performance of a linear decision feedback equalizer based on the minimum error probability criterion," em *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1974, pp. 25F1-25F5.
- [58] S. Chen, E. S. Chng, B. Mulgrew e G. Gibson, "Minimum-BER linear-combiner DFE," em *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 2, Dallas, TX, 1996, pp. 1173-1177.
- [59] I. N. Psaromiligkos, S. N. Batalama e D. A. Pados, "On adaptive minimum probability of error linear filter receivers for DS-CDMA channels," *IEEE Transactions Communications*, vol. 47, pp. 1092-1102, Julho, 1999.

- [60] C. C. Yeh e J. R. Barry, "Approximate minimum bit-error rate equalization for binary signaling," em *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 2, Montreal, PQ, Canada, 1997, pp. 1095-1099.
- [61] C. C. Yeh, R. R. Lopes e J. R. Barry, "Approximate minimum bit error rate multiuser detection," em *Proceedings Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Sydney, Australia, Novembro, 1998, pp. 3590-3595.
- [62] B. Mulgrew e S. Chen, "Stochastic gradient minimum-BER decision feedback equalisers," em *Proceedings IEEE Symposium on Adaptive Systems, Signal Processing, Communications and Control*, Lake Louise, AB, Canada, Outubro, 2000, pp. 93-98.
- [63] S. Chen, A. K. Samingan, B. Mulgrew e L. Hanzo, "Adaptive Minimum BER Linear Multiuser Detection," em *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Salt Lake City, E.U.A., Maio, 2001, pp. 2253-2256.
- [64] S. Chen, A. K. Samingan, B. Mulgrew e L. Hanzo, "Adaptive minimum-BER linear multiuser detection for DS-CDMA signals in multipath channels," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 6, Junho, 2001.
- [65] A. Duel-Hallen, "A family of multiuser decision-feedback detectors for asynchronous CDMA channels," *IEEE Transactions Communications*, vol. 43, Fevereiro-Abril, 1995.
- [66] G. Woodward, R. Ratasuk, M. Honig. e P. Rapajic, "Multistage decision-feedback detection for DS-CDMA," em *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Junho, 1999.
- [67] D. A. Pierre, *Optimization Theory with Applications*, Dover Publications, New York, 1986.
- [68] P. S. R. Diniz, M. L. R. de Campos e A. Antoniou, "Analysis of LMS-Newton Adaptive Filtering Algorithms with Variable Convergence Factors", *Transactions on Signal Processing*, vol. 43, no. 3, Março, 1995.
- [69] B. T. Polyak e A. B. Juditsky, "Acceleration of stochastic approximation by averaging," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 30, no. 4, pp. 838-855, Julho, 1992.
- [70] L. Ljung, "Aspects on accelerated convergence in stochastic approximation schemes," em *Proceedings 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, Lake Buena Vista, FL, 1994, pp. 1649-1652.

- [71] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Adaptive Minimum BER Decision Feedback Multiuser Receivers for DS-CDMA," em *Proceedings SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium*, Setembro, 2002.
- [72] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Adaptive Channel Equalisation Using Minimum BER Gradient-Newton Algorithms," em *Proceedings SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium*, Setembro, 2002.
- [73] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "An Approximate Minimum BER Approach to Channel Equalisation Using Recurrent Neural Networks," em *Proceedings SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium*, Setembro, 2002.
- [74] R. C. de Lamare e Jacques Szczupak, "Adaptive Minimum BER Channel Equalisation in DMT Systems," em *Proceedings SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium*, Setembro, 2002.
- [75] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "An Approximate Minimum BER Approach to Multiuser Detection using Recurrent Neural Networks," em *Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Lisboa, Portugal, Setembro, 2002.
- [76] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Adaptive Multiuser Receivers for DS-CDMA Using Minimum BER Gradient-Newton Algorithms," em *Proceedings IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Lisboa, Portugal, Setembro, 2002.
- [77] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Adaptive Minimum BER Interference Suppression for DS-CDMA using Averaging Methods in Multipath Fading Channels," em *Anais do SBrT XX Simposio Brasileiro de Telecomunicações*, Rio de Janeiro, Brasil, Outubro, 2003.
- [78] R. C. de Lamare e R. Sampaio-Neto, "Adaptive MBER Decision Feedback Multiuser Receivers in Frequency Selective Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol.7, no.2, Fevereiro, 2003.
- [79] M. Honig, U. Madhow e S. Verdú, "Blind adaptive multiuser detection," *IEEE Transactions Information Theory*, vol. 41, pp. 944-960, July 1995.
- [80] X. Wang e H. V. Poor, "Blind equalization and multiuser detection in dispersive CDMA channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, pp. 91-103, Janeiro, 1998.
- [81] X. Wang e H. V. Poor, "Blind multiuser detection: A subspace approach," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, pp. 677-690, Março, 1998.

- [82] J. Shen e Z. Ding, "Blind adaptive multiuser CDMA detection based on a linear projection constraint," em *Proceedings SPAWC'97*, Paris, França, Abril, 1997, pp. 261-264.
- [83] M. K. Tsatsanis, "Inverse filtering criteria for CDMA systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, pp. 102-112, Jan. 1997.
- [84] H. Liu e K. Li, "Low complexity receivers for CDMA communications over frequency-selective channels," em *Proceedings SPAWC'97*, Paris, França, Abril, 1997, pp. 265-268.
- [85] M. K. Tsatsanis e Z. Xu, "Performance analysis of minimum variance CDMA receivers," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, pp. 3014-3022, Novembro, 1998.
- [86] Z. Xu e M.K. Tsatsanis, "Blind adaptive algorithms for minimum variance CDMA receivers," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, No. 1, Janeiro, 2001.
- [87] Z. Xu, P. Liu e X. Wang, "Blind Multiuser Detection: from MOE to Subspace Methods," *IEEE Transactions Signal Processing*, vol. 52, No. 2, Fevereiro, 2004.
- [88] T. T. V. Vinhoza, R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Receptores Melhorados de Mínima Variância para CDMA com Estimação Conjunta de Canal para Canais Seletivos em Freqüência", em *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Belém, Outubro, 2004.
- [89] T. T. V. Vinhoza, R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Enhanced Blind Minimum Variance CDMA Receivers with Joint Channel Estimation for Frequency Selective Channels", em *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Los Angeles, 2004.
- [90] O. L. Frost III, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing", *Proceedings of IEEE*, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, Agosto, 1972.
- [91] L. S. Resende, J. M. T. Romano e M. G. Bellanger, "A Fast Least Squares Algorithm for Linearly Constrained Adaptive Filtering", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, No. 5, Maio, 1996.
- [92] J. A. Apolinário Jr., S. Werner, T. Laakso, P. S. R. Diniz, "Constrained normalized adaptive filtering for CDMA mobile communications," *European Signal Processing Conference, EUSIPCO'98*, Ilha de Rhodes, Grécia, Setembro, 1998.
- [93] V. Krishnamurthy, "Averaged stochastic gradient algorithms for adaptive blind multiuser detection in DS/CDMA systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, pp. 125-134, Fevereiro, 2000.

- [94] D. Das e M. K. Varanasi, "Blind Adaptive Multiuser Detection for Cellular Systems Using Stochastic Approximation With Averaging," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, No. 2, Fevereiro, 2002.
- [95] B. T. Polyak e A. B. Juditsky, "Acceleration of stochastic approximation by averaging," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 30, no. 4, pp. 838-855, Julho, 1992.
- [96] V. Krishnamurthy, G. Yin e S. Singh, "Adaptive Step-Size Algorithms for Blind Interference Suppression in DS/CDMA Systems," *IEEE Transactions on Signal Processing* vol. 49, No. 1, Janeiro, 2001.
- [97] P. Yuvapoositanon e J. Chambers, "An Adaptive Step-Size Code Constrained Minimum Output Energy Receiver for Non-Stationary CDMA Channels," *IEEE Proceedings of International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2003.
- [98] J. M. Brossier, "Egalization Adaptive et Estimation de Phase: Application aux Communications Sous-Marines," tese de doutorado, Inst. Nat. Polytech. Grenoble, Grenoble, França, 1992 e tese de doutorado em matemática aplicada na Brown University, Providence, RI, Estados Unidos, 1987.
- [99] V. J. Mathews e Z. Xie, "A stochastic gradient adaptive filter with gradient adaptive step size," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, pp. 2075-2087, Junho, 1993.
- [100] H. J. Kushner e J. Yang, "Analysis of adaptive step-size algorithms for parameter tracking," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, pp. 1403-1410, Agosto, 1995.
- [101] R. H. Kwong e E. W. Johnston, "A variable step size LMS algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 40, pp. 1633-1642, Julho, 1992.
- [102] T. Aboulnasr e K. Mayyas, "A Robust Variable Step-Size LMS-Type Algorithm: Analysis and Simulations", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, No.3, Fevereiro, 1997.
- [103] Y. Sato, "A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 23, No. 6, Junho, 1975.
- [104] D. N. Godard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, no. 11, pp. 1867-1875, Novembro, 1980.
- [105] J. R. Treichler e B. G. Agee, "A new approach to multipath correction of constant modulus signals," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-31, pp. 459-472, Abril, 1983.

- [106] H. Zeng, L. Tong e C. R. Johnson, “Relationships between the constant modulus and Wiener receivers”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, pp. 1523-1538, Julho, 1998.
- [107] H. Zeng, L. Tong e C. R. Johnson, “An Analysis of Constant Modulus Receivers”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 47, No. 11, Novembro, 1999.
- [108] M. Gu e L. Tong, “Geometrical Characterizations of Constant Modulus Receivers”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, No. 10, Outubro, 2001.
- [109] C. B. Papadias e A. J. Paulraj, “A Constant Modulus Algorithm for Multiuser Signal Separation in Presence of Delay Spread Using Antenna Arrays”, *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 4, No. 6, Julho, 1997.
- [110] J. Miguez e L. Castedo, “A linearly constrained constant modulus approach to blind adaptive multiuser interference suppression,” *IEEE Communications Letters*, vol. 2, pp. 217-219, Agosto, 1998.
- [111] X. Li e H. H. Fan, “Direct Blind Multiuser Detection for CDMA in Multipath without Channel Estimation”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, No. 1, Janeiro, 2001.
- [112] J. K. Tugnait e T. Li, “Blind detection of asynchronous CDMA signals in multipath channels using code-constrained inverse filter criterion,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, No. 7, Julho, 2001.
- [113] J. Ma e J. K. Tugnait, “Blind Detection of Multirate Asynchronous CDMA Signals in Multipath Channels”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, No. 9, Setembro, 2002.
- [114] C. Xu, G. Feng e K. S. Kwak, “A Modified Constrained Constant Modulus Approach to Blind Adaptive Multiuser Detection,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, No. 9, Setembro, 2001.
- [115] Z. Xu e P. Liu, “Code-Constrained Blind Detection of CDMA Signals in Multipath Channels,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 9, No. 12, Dezembro, 2002.
- [116] X. G. Doukopoulos e G. V. Moustakides, “Blind Channel Estimation for Downlink CDMA Systems,” *Proceedings IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2003.
- [117] X. G. Doukopoulos e G. V. Moustakides, “Power Techniques for Blind Adaptive Channel Estimation in CDMA Systems,” em *Proceedings IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2003.

- [118] S. E. Bensley e B. Aazhang, "Subspace-based channel estimation for code division multiple access communication systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, pp. 1009-1020, Agosto, 1996.
- [119] B. Yang, "Projection approximation subspace tracking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 44, pp. 95-107, Janeiro, 1995.
- [120] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Low Complexity Variable Step Size Mechanisms for Constrained Minimum Variance CDMA Receivers," *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Milão, Maio, 2004.
- [121] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Blind Adaptive Code-Constrained Constant Modulus RLS Algorithm for CDMA Receivers in Frequency Selective Channels," *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Milão, Maio, 2004.
- [122] R. C. de Lamare e R. Sampaio Neto, "Blind Adaptive Code-Constrained Constant Modulus Algorithms for CDMA Interference Suppression in Multipath Channels," *IEEE Communications Letters*, artigo aceito.
- [123] A. Duel-Hallen, "A family of multiuser decision-feedback detectors for asynchronous CDMA channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, Fevereiro-Abril, 1995.
- [124] M. K. Varanasi e T. Guess, "Optimum decision feedback multiuser equalization with successive decoding achieves the total capacity of the Gaussian multiple-access channel," em *Proceedings 31st Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, Monterey, Novembro, 1997, pp. 1405-1409.
- [125] G. Woodward, R. Ratasuk, M. L. Honig e P. Rapajic, "Minimum Mean-Squared Error Multiuser Decision-Feedback Detectors for DS-CDMA," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 12, Dezembro, 2002.
- [126] M. Honig, G. Woodward e Y. Sun, "Adaptive Iterative Multiuser Decision Feedback Detection," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 3, no. 2, Março, 2004.
- [127] R. C. de Lamare e R. Sampaio-Neto, "Blind Adaptive Decision Feedback DS-CDMA Receivers for Selective Channels," em *Proceedings IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Barcelona, Espanha, Setembro, 2004.
- [128] R. C. de Lamare e R. Sampaio-Neto, "Blind Adaptive Decision Feedback CDMA Receivers for Dispersive Channels," *IEE Electronics Letters*, vol. 40, no. 5, Março, 2004.

- [129] S. Verdú e S. Shamai, "Spectral efficiency of CDMA with random spreading," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, pp. 622-640, 1999.
- [130] P. B. Rapajic, M. L. Honig, e G. K. Woodward, "Multiuser decision-feedback detection: Performance bounds and adaptive algorithms," em *Proceedings IEEE International Symposium on Information Theory*, Boston, MA, Agosto, 1998, p. 34.
- [131] H. Ping, T. T. Tjung e L. K. Rasmussen, "Decision Feedback Blind Adaptive Multiuser Detector for Synchronous CDMA System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 1, Janeiro, 2000.
- [132] B.-G. Choi e K.-S. Kwack, "Decision Feedback Blind Adaptive Multiuser Detector with MSE Equalizer in Synchronous DS-CDMA," em *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference*, 2002.
- [133] R. Narasimha e S. A. Dianat, "Blind Adaptive Decision Feedback Multiuser Detector for DS-CDMA with Power Estimation," *Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference*, 2002.
- [134] G. Barriac e U. Madhow, "PASIC: A New Paradigm for Low-Complexity Multiuser Detection", em *Proceedings Conference on Information Sciences and Systems*, The Johns Hopkins University, March 21-23, 2001.
- [135] G. H. Golub e C. F. van Loan, *Matrix Computations*, 3rd ed., The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Md, 1996.
- [136] J. P. de Villiers e L. P. Linde, "On the Convexity of the LCCM Cost Function for DS-CDMA Blind Multiuser Detection", *IEEE Communications Letters*, vol. 8, no. 6, Junho, 2004.
- [137] M. Latva-aho e M. J. Juntti, "MMSE detection of DS-CDMA systems in fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, pp. 194-199, Fevereiro, 2000.
- [138] S. L. Miller, M. L. Honig e L. B. Milstein, "Performance analysis of MMSE receivers for DS-CDMA in frequency-selective fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 11, Novembro, 2000.
- [139] A. N. Barbosa e S. L. Miller, "Adaptive detection of DS-CDMA signal in fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, pp. 115-124, Janeiro, 1998.
- [140] A. Klein, G. Kaleh, e P. Baier, "Zero forcing and minimum mean-square-error equalization for multiuser detection in code-division multiple-access channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 45, no. 2, pp. 276-287, 1996.

- [141] T. Krauss, W. Hillery, e M. Zoltowski, “Downlink specific linear equalization for frequency selective CDMA cellular systems,” *Journal of VLSI Signal Processing*, vol. 30, no. 1-3, pp. 143-161, 2002.
- [142] M. L. Honig, S. L. Miller, M. J. Shensa e L. B. Milstein, “Performance of Adaptive Linear Interference Suppression in the Presence of Dynamic Fading,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 4, Abril, 2001.
- [143] A. M. Haimovich e Y. Bar-Ness, “An eigenanalysis interference canceler,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 39, pp. 76-84, Janeiro, 1991.
- [144] X. Wang e H. V. Poor, “Blind multiuser detection: A subspace approach,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, pp. 677-690, Março, 1998.
- [145] Y. Song e S. Roy, “Blind adaptive reduced-rank detection for DS-CDMA signals in multipath channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, pp. 1960-1970, Novembro, 1999.
- [146] J. S. Goldstein e I. S. Reed, “Reduced rank adaptive filtering,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, pp. 492-496, Fevereiro, 1997.
- [147] R. Singh e L. B. Milstein, “Interference suppression for DS/CDMA,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, pp. 446-453, Março, 1999.
- [148] R. Singh e L. B. Milstein, “Adaptive interference suppression for DS/CDMA,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 12, pp. 1902-1905, Novembro, 2002.
- [149] J. S. Goldstein, I. S. Reed e L. L. Scharf, “A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, Novembro, 1998.
- [150] D. A. Pados e S. N. Batalama, “Low complexity blind detection of DS/CDMA signals: Auxiliary-vector receivers,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, pp. 1586-1594, Dezembro, 1997.
- [151] D. A. Pados e S. N. Batalama, “Joint space-time auxiliary-vector filtering for DS/CDMA systems with antenna arrays,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, No. 2, Setembro, 1999.
- [152] D. A. Pados, F. J. Lombardo e S. N. Batalama, “Auxiliary Vector Filters and Adaptive Steering for DS-CDMA Single-User Detection,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, No. 6, Novembro, 1999.

- [153] W. Chen, U. Mitra, e P. Schniter, "On the equivalence of three reduced rank linear estimators with applications to DS-CDMA," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.48, pp. 2609-2614, Setembro, 2002.
- [154] D. A. Pados e G. N. Karystinos, "An iterative algorithm for the computation of the MVDR filter," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, No. 2, Fevereiro, 2001.
- [155] G. N. Karystinos, H. Qian, M. J. Medley, e S. N. Batalama, "Short-data-record adaptive filtering: The auxiliary-vector algorithm," *Digital Signal Processing, Special Issue on Defense Applications*, vol. 12, pp. 193-222, Julho, 2002.
- [156] M. L. Honig e J. S. Goldstein, "Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage Wiener filter," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 6, Junho, 2002.
- [157] Y. Neuvo, C. Y. Dong e S. K. Mitra, "Interpolated finite impulse response filters," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-32, pp. 563-570, Junho, 1984.
- [158] T. Saramaki, Y. Neuvo, e S. K. Mitra, "Design of Computationally Efficient Interpolated FIR Filters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 35, No. 1, Janeiro, 1988.
- [159] A. Abousaada, T. Abousnasr e W. Steenaart, "An Echo Tail Canceller based on Adaptive Interpolated FIR Filtering," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, vol. 39, pp. 409-416, Julho, 1992.
- [160] L. S. Resende, C. A. F. Rocha e M. G. Bellanger, "A Linearly Constrained Approach to the Interpolated FIR Filtering Problem", em *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, 2000.
- [161] L. S. Resende, C. A. F. Rocha e M. G. Bellanger, "A New Structure for Adaptive IFIR Filtering," em *Proceedings IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*, 2001.
- [162] R. C. de Lamare e Raimundo Sampaio Neto, "Receptores Multiusuário MMSE com Posto Reduzido para DS-CDMA usando Filtros FIR Interpolados," em *Anais do SBrT XX Simposio Brasileiro de Telecomunicações*, Rio de Janeiro, Brasil, Outubro, 2003.
- [163] R. C. de Lamare e Raimundo Sampaio-Neto, "Reduced-rank Interference Suppression for DS-CDMA based on Interpolated FIR Filters", *IEEE Communications Letters*, 2004, artigo aceito para publicação.

- [164] R. C. de Lamare e Raimundo Sampaio-Neto, “Adaptive Reduced-Rank MMSE Filtering with Interpolated FIR Filters and Adaptive Interpolators”, *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, artigo aceito para publicação.
- [165] R. C. de Lamare e Raimundo Sampaio-Neto, “Reduced-Rank Interference Suppression for DS-CDMA using Adaptive Interpolated FIR Filters with Adaptive Interpolators”, em *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Barcelona, Setembro, 2004.
- [166] R. C. de Lamare e Raimundo Sampaio-Neto, “Blind Adaptive Reduced-Rank CDMA Receivers based on Interpolated FIR Filters with Adaptive Interpolators in Multipath Channels”, em *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Dallas, Dezembro, 2004.
- [167] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Athena Scientific, 2nd Ed., 1999.
- [168] D. T. M. Slock, “On the convergence behavior of the LMS and the normalized LMS algorithms,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 9, Setembro, 1993.
- [169] N. R. Yousef e A. H. Sayed, “Ability of Adaptive Filters to Track Carrier Offsets and Channel Nonstationarities”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 7, Julho, 2002.
- [170] N. Al-Dhahir e A. H. Sayed, “The finite-length MIMO MMSE-DFE,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, pp. 2921-2936, Outubro, 2000.
- [171] V. Tarokh, N. Seshadri, e A. R. Calderbank, “Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and code construction,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, pp. 744-765, Março, 1998.
- [172] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, pp. 1451 -1458, Outubro, 1998.
- [173] V. Tarokh, A. Naguib, N. Seshadri, e A. R. Calderbank, “Combined array processing and space-time coding,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 4, pp. 1121-1128, Maio, 1999.