

Uma análise comparativa de algoritmos de *beamforming* aplicados a cenários de 5G V2X

César Druczkoski, Cynthia Junqueira, Adilson Chinatto e Rafael Ferrari

Resumo—Este artigo avalia o desempenho de quatro algoritmos adaptativos de conformação de feixe em uma aplicação móvel *vehicle-to-everything* (V2X) 5G. Os algoritmos estudados são aplicados a uma rede planar uniforme (*uniform planar array*, UPA) onde incidem sinais *quadrature phase-shift keying* de banda estreita partindo de fontes que sofrem efeitos de espalhamento e multipercursos. Os cenários representativos da movimentação veicular são definidos por velocidades angulares em elevação e azimute, iniciadas em momentos distintos da convergência dos algoritmos. A comparação entre seus desempenhos é realizada por meio de curvas de *symbol error rate* instantâneas.

Palavras-Chave—Processamento adaptativo de sinais, conformação de feixe, rede de antenas, 5G, V2X.

Abstract—This paper evaluates the performance of four adaptive beamforming algorithms in a vehicle-to-everything (V2X) 5G mobile application. The algorithms studied are applied to a uniform planar array (UPA) where narrowband quadrature phase-shift keying signals impinge from sources that suffer from spreading and multipropagations effects. The vehicular movement representative scenarios are defined by angular velocities in elevation and azimuth starting at different moments of the algorithms' convergence. The comparison of performances is done by means of their instantaneous symbol error rate curves.

Keywords—Adaptive signal processing, beamforming, antenna array, 5G, V2X.

I. INTRODUÇÃO

Novas pesquisas e desenvolvimentos focados na quinta geração de redes móveis (5G) têm recebido grande atenção tanto da comunidade acadêmica quanto industrial. Este novo padrão vem como resposta ao aumento de demanda de sistemas móveis, com o aumento de clientes e de novas tecnologias que se beneficiam de conexões sem-fio.

Aplicações de *machine-type communication* (MTC) massivas como agricultura inteligente e logística exigem desta nova rede aporte a um grande número de usuários e baixo consumo de energia. Em contraste, aplicações de MTC críticas, como controle de tráfego, veículos autônomos, veículos inteligentes, *smart grid*, automação industrial, controle de processos fabris a distância e também na área de saúde com o apelo para cirurgias remotas, aumentam enormemente as exigências de confiabilidade, baixa latência e de disponibilidade [1].

César Druczkoski, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Brasil, e-mail: cmdcido@dca.fee.unicamp.br; Cynthia Junqueira, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Brasil, e-mail: cynthiaj@decom.fee.unicamp.br; Adilson Chinatto, Espectro Ltda., Campinas - SP, Brasil, e-mail: chinatto@espectro-eng.com.br; Rafael Ferrari, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Brasil, e-mail: rferari@dca.fee.unicamp.br.

Necessidades desta natureza norteiam os objetivos de um sistema 5G que atendam ao aumento de 1000 vezes no volume de dados móveis por área, aumento de 10 a 100 vezes no número de equipamentos conectados, redução em 10 vezes no consumo de bateria para equipamentos MTC, redução em 5 vezes na latência ponta-a-ponta (*end-to-end*, E2E) [2]. Em vista destes objetivos, as tecnologias mais disruptivas são as presentes em sistemas de ondas milimétricas (*mmWave*), *Massive MIMO*, arquiteturas descentralizadas, dispositivos inteligentes (*smart devices*) com comunicação dispositivo-a-dispositivo (*device-to-device*, D2D) e suporte a comunicação máquina-a-máquina (*machine-to-machine*, M2M) [3].

Em cenários móveis como comunicação entre automóveis, entre estes e estações base ou usuários englobados na tecnologia conhecida como *vehicle-to-everything* (V2X) [4], técnicas de multiplexação e de filtragem espacial como a conformação de feixes (*beamforming*) trazem benefícios em detectar a direção de chegada (*direction of arrival*, DOA) de um sinal desejado, focar a rede nesta direção, bem como compensar efeitos do canal e de múltiplas reflexões [5]. Em *mmWave* este último benefício traz a principal vantagem de seu uso visto o comportamento diferente do canal em frequências mais altas, com maiores perdas e espalhamento [6].

Estas aplicações, porém, devem ser feitas tomando-se o devido cuidado com os tipos e propriedades dos algoritmos escolhidos dado o grande número de algoritmos de conformação de feixe presentes na literatura. Algoritmos com um ótimo desempenho em cenários com pequenas movimentações ou um número baixo de sinais indesejados podem não ter o desempenho esperado em cenário mais dinâmicos. Como exemplo tem-se o algoritmo de módulo constante (*constant modulus algorithm*, CMA) [7], que apresenta um baixo desempenho para cenários de alta mobilidade e quando os sinais indesejados possuem mesma modulação do sinal desejado.

Assim, este artigo visa explorar o desempenho de algoritmos recentemente sugeridos como opções para realização de conformação de feixe no escopo do 5G, aplicando-os a cenários dinâmicos, conforme previsto no conceito V2X. O objetivo principal é identificar parâmetros de desempenho que possam ser melhorados em futuras implementações destes algoritmos, aumentando sua robustez e ampliando as possibilidades para sua aplicação. O estudo é feito analisando a resposta de cada algoritmo a diferentes combinações de movimentação de uma rede de antenas planar uniforme (*uniform planar array*, UPA) simulando um sistema embarcado em um veículo que se move com diferentes velocidades e direções. Os resultados são apresentados em curvas de *symbol*

error rate (SER) instantâneo ¹.

Este trabalho é dividido em seções com a seção II descrevendo o modelo de sinal utilizado e a seção III a rede de antenas adaptativas. Na seção IV são apresentados os algoritmos estudados e na seção V definidas as configurações de cada algoritmo e cenários de simulação. A seção VI apresenta e discute os resultados. Finalmente, a seção VII traz as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

II. MODELO DE SINAL

O modelo de sinal utilizado neste artigo considera que todos os sinais incidentes na rede são de banda estreita e sofrem efeitos de múltiplas reflexões e difrações. Os multipercursos causam diferentes atenuações e atrasos de forma que o sinal incidente na rede pode ser representado pela Eq. 1 [8].

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \mathbf{a}(\theta_{ml}) P_m \alpha_{ml} s_m(t - \tau_{ml}) + \eta(t), \quad (1)$$

em que M é o número de sinais incidentes, L o número máximo de multipercursos para um sinal, $\mathbf{a}(\theta_{ml})$ o vetor de direcionamento (*steering vector*) do m -ésimo sinal incidente pelo l -ésimo percurso, θ_{ml} a direção de chegada do sinal, P_m a amplitude de cada sinal, α_{ml} e τ_{ml} a atenuação e o atraso de cada percurso, $s_m(t)$ o sinal incidente e $\eta(t)$ o ruído branco aditivo. Considerando que $s_m(t)$ seja um sinal com modulação digital e que os atrasos de propagação são muito menores que o inverso da largura de banda dos sinais, pode-se modelá-los como defasagens [8] e simplificar a Eq. 1 na Eq. 2.

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \mathbf{a}(\theta_{ml}) P_m \alpha_{ml} e^{-j\omega_c \tau_{ml}} b_m(n) + \eta(n), \quad (2)$$

em que ω_c é a frequência de transmissão e $b_m(n)$ o símbolo do sinal dentro do alfabeto da modulação.

III. REDE DE ANTENAS ADAPTATIVAS

Redes de antenas adaptativas aliam arranjos de antenas a algoritmos adaptativos de forma a compensar o fator da rede (FA), ou seja, as defasagens entre os elementos da rede (Fig. 1a) e gerar padrões de radiação distintos com diferentes amplitudes e fase de acordo com o ambiente sem-fio [5]. O ganho e a capacidade de supressão da rede são uma função do número de antenas, K , que, em teoria, seria capaz de anular $K - 1$ sinais indesejados [9] focando o feixe principal do diagrama de radiação na direção do sinal desejado, ou de interesse (*signal of interest*, SOI) e os nulos na direção dos sinais indesejados (*signal not of interest*, SNOI).

Neste trabalho, dentre as possíveis configurações, a rede planar uniforme (Fig. 1b), com FA dado pela Eq. 3, foi escolhida pela capacidade de conformação de feixe bidimensional (elevação, θ , e azimute, ϕ) mesmo que limitada [5].

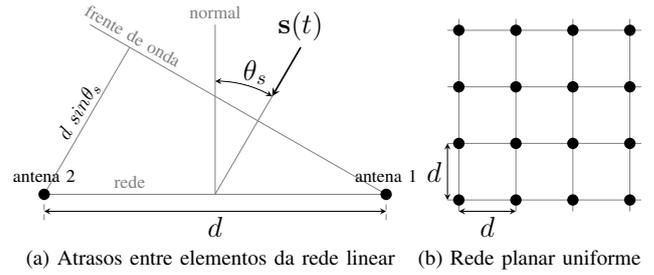


Fig. 1: Rede de antenas planar uniforme.

$$\mathbf{FA} = \sum_{k_h=1}^{K_h} e^{j(k_h-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_m \cos\phi_m} \sum_{k_v=1}^{K_v} e^{j(k_v-1) \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_m \sin\phi_m}, \quad (3)$$

sendo K_h o número de antenas na horizontal e K_v na vertical, d o espaçamento dos elementos da rede, λ o comprimento de onda do sinal e θ_m e ϕ_m os ângulos de elevação e azimute de chegada do m -ésimo sinal incidente na rede.

IV. ALGORITMOS

Nesta seção são apresentadas as considerações básicas e as equações iterativas dos algoritmos considerados neste estudo.

A. Linearly constrained minimum variance (LCMV)

O algoritmo adaptativo LCMV, ou de Frost, funciona de maneira iterativa, minimizando uma função custo quadrática acrescida de uma restrição. A solução, apoiada pelo método dos multiplicadores de Lagrange [10], é vista na Eq. 4 [11].

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(0) &= \mathbf{F} \\ \mathbf{w}(n+1) &= \mathbf{R}(\mathbf{w}(n) - \mu y(n) \mathbf{x}(n)^H) + \mathbf{F} \\ \mathbf{R} &= \mathbf{I} - \mathbf{C}(\mathbf{C}^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^H \\ \mathbf{F} &= \mathbf{C}(\mathbf{C}^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f}, \end{aligned} \quad (4)$$

em que $y(n)$ é a estimativa do sinal desejado, $\mathbf{w}(n)$ o vetor de pesos do filtro e $\mathbf{x}(n)$ o vetor do sinal recebido, \mathbf{f} o vetor de restrições lineares e \mathbf{C} a matriz de restrições de direção baseados no conhecimento do DOA do SOI, μ o passo de adaptação, \mathbf{I} a matriz identidade e H o operador hermitiano.

B. Adaptive-projection constrained stochastic gradient (AP-CSG)

Para maximização da SINR, o algoritmo AP-CSG maximiza iterativamente a projeção dos coeficientes do filtro no subespaço do SOI ao mesmo tempo minimizando sua projeção no subespaço dos SNOIs, a Eq. 5 [12].

$$\begin{aligned} \mathbf{w}'(n) &= \mathbf{w}(n) + \mu_2 \frac{\mathbf{d}(n) \mathbf{d}^H(n)}{\|\mathbf{d}(n)\|^2} \mathbf{w}(n) \\ &\quad - \mu_1 \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{d}(n) \mathbf{d}^H(n)}{\|\mathbf{d}(n)\|^2} \right] \mathbf{z}(n) \mathbf{z}^H(n) \mathbf{w}(n) \\ \mathbf{w}(n+1) &= \frac{\mathbf{w}'(n)}{\|\mathbf{w}'(n)\|}, \end{aligned} \quad (5)$$

¹SER_{instantâneo} = número de erros de símbolo/número de símbolos transmitidos

em que μ_1 e μ_2 são os passos de atualização tal que μ_1 e $\mu_2 \ll 1$, $\mathbf{d}(n)$ o vetor do sinal de referência do SOI e $\mathbf{z}(n)$ o vetor dos SNOIs tal que $\mathbf{z}(n) = \mathbf{x}(n) - \mathbf{d}(n)$.

C. Adaptive-projection quadratically constrained stochastic gradient (AP-QCSG)

Da mesma forma que o anterior, o algoritmo AP-QCSG visa a maximização da SINR pelo métodos dos subespaços, porém utiliza outra restrição de projeção, que leva à Eq. 6 [13].

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G}_d(n) &= |\mathbf{w}^H(n)\mathbf{d}(n)|^2 \\
 \mathbf{G}_{dz}(n) &= \mathbf{w}^H(n)\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)\mathbf{z}(n)\mathbf{z}^H(n)\mathbf{w}(n) \\
 \Delta(n) &= (1 + \mu_2)\mathbf{G}_d^2(n) - \mu_1^2 \text{Im}^2[\mathbf{G}_{dz}(n)] \\
 \chi(n) &= \mathbf{G}_d^{-1}(n) \left[\frac{1}{2}\mu_1 \mathbf{G}_{dz}^*(n) - \sqrt{\Delta(n)} \right] - 1 \\
 \mathbf{w}'(n) &= \mathbf{w}(n) + \chi(n) \frac{\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)}{\|\mathbf{d}(n)\|^2} \mathbf{w}(n) \\
 &\quad - \mu_1 \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)}{2\|\mathbf{d}(n)\|^2} \right] \mathbf{z}(n)\mathbf{z}^H(n)\mathbf{w}(n) \\
 \mathbf{w}(n+1) &= \frac{\mathbf{w}'(n)}{\|\mathbf{w}'(n)\|},
 \end{aligned} \tag{6}$$

em que μ_1 e μ_2 são os passos tal que $\mu_1 \mu_2 \ll 1$ e $\text{Im}[\cdot]$ é o operador que devolve parte imaginária.

D. Double sigmoid adaptive combination of vector projections (DS-ACVP)

Baseado no comportamento estatístico dos dois algoritmos anteriores, o algoritmo DS-ACVP maximiza a SINR utilizando a combinação linear de três vetores segundo a Eq. 7 [14].

$$\begin{aligned}
 \underline{\mathbf{R}}_{SOI} &= E \left[\frac{\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)}{\|\mathbf{d}(n)\|^2} \right] \quad \underline{\mathbf{R}}_{SNOI} = E \left[\frac{\mathbf{z}(n)\mathbf{z}^H(n)}{\|\mathbf{z}(n)\|^2} \right] \\
 \mathbf{q}_1(n) &= \frac{1}{2}\mu\{1 - \phi_1^2[\alpha_1(n)]\} \frac{\mathbf{z}(n)\mathbf{z}^H(n)}{\|\mathbf{z}(n)\|^2} \mathbf{w}(n) \\
 \mathbf{q}_2(n) &= \mu\phi_2[\alpha_1(n)]\{1 - \phi_1[\alpha_1(n)]\} \frac{\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)}{\|\mathbf{d}(n)\|^2} \mathbf{w}(n) \\
 \phi_1[\alpha_1(n)] &= \frac{2}{1 + e^{-\alpha_1(n)}} - 1 \quad \phi_2[\alpha_2(n)] = \frac{1}{1 + e^{-\alpha_2(n)}} \\
 \beta_i &= \begin{cases} \mu\phi_i[\alpha_i(n)] & \text{se } i = [1, 2] \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases} \\
 \bar{\mathbf{v}}_1(n) &= \underline{\mathbf{R}}_{SNOI} E[\mathbf{w}(n)] \quad \bar{\mathbf{v}}_2(n) = \underline{\mathbf{R}}_{SOI} E[\mathbf{w}(n)] \\
 \bar{\mathbf{v}}_3(n) &= \underline{\mathbf{R}}_{SOI} \bar{\mathbf{v}}_1(n) \\
 E[\mathbf{w}(n+1)] &= E[\mathbf{w}(n)] + \sum_{n=1}^3 \beta_i \bar{\mathbf{v}}_i(n) \\
 \alpha_i(n+1) &= \alpha_i(n) + \mu_\alpha \frac{\text{Re}[\mathbf{q}_i^H(n)\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)\mathbf{w}(n+1)]}{\mathbf{w}^H(n+1)\mathbf{d}(n)\mathbf{d}^H(n)\mathbf{w}(n+1)} \\
 &\quad - \mu_\alpha \frac{\text{Re}[\mathbf{q}_i^H(n)\mathbf{z}(n)\mathbf{z}^H(n)\mathbf{w}(n+1)]}{\mathbf{w}^H(n+1)\mathbf{z}(n)\mathbf{z}^H(n)\mathbf{w}(n+1)},
 \end{aligned} \tag{7}$$

onde $E[\cdot]$ é o operador valor esperado e μ e μ_α os passos de atualização tal que $0 < \mu < 1$.

V. SIMULAÇÃO

O cenário escolhido para a análise dos algoritmos foi uma rede de configuração UPA com 4 antenas (2×2) espaçadas em meio comprimento de onda, $d = \lambda/2$. Nela incidem um sinal desejado e mais 2 sinais indesejados representando um problema onde a principal fonte de interferência cocanal. Estes sinais têm modulação com constelação de 4 símbolos, QPSK, e potências $P_{1,2,3} = [30 \ 20 \ 20]$ dB corrompidos por ruído branco aditivo e gaussiano. Estes sinais se propagam por 9 multipercursos (3×3) com espalhamento de 3° , tanto em azimute como em elevação, partindo das direções $\text{DOA}_{1,2,3}^\phi = [0^\circ \ 28^\circ \ -17^\circ]$ e $\text{DOA}_{1,2,3}^\theta = [0^\circ \ -12^\circ \ 35^\circ]$. Cada multipercursos, considerado um canal de Rayleigh, tem sua defasagem e atenuação modeladas por variáveis aleatórias complexas de distribuição normal, tal que $\alpha_{ml} e^{-j\omega_c \tau_{ml}} \sim \mathcal{N}(0, 1/9)$ [12].

Para as simulações, as configurações aplicadas aos algoritmos são apresentadas a seguir:

- Conformador de feixe LCMV com 1 coeficiente por antena, $\mu = 10^{-4}$, inicialização dada pela Eq. 4 e DOA do SOI conhecido (por técnicas como [15] e [16]);
- Conformador de feixe AP-CSG com $\mu_1 = 10^{-3}$, $\mu_2 = 0,5$, inicialização com $\mathbf{w}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e $d(n)$ conhecido (por técnicas como as presentes em [8]);
- Conformador de feixe AP-QCSG com $\mu_1 = 10^{-3}$, $\mu_2 = 0,7$, inicialização com $\mathbf{w}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e $d(n)$ conhecido (por técnicas como as presentes em [8]);
- Conformador de feixe DS-ACVP com $\mu = 0,01$, $\mu_\alpha = 0,5$, inicialização com $\mathbf{w}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ e $\alpha_{1,2}(0) = 0$ e $d(n)$ conhecido (por técnicas como as presentes em [8]).

A dinâmica de movimentação foi simulada como variações angulares de elevação e azimute da rede e os sinais estáticos. Cada tipo de movimentação aplicada à rede tem sua velocidade angular e início definidos segundo os parâmetros $\Delta\theta$ (amplitude de variação angular em elevação), $\Delta\phi$ (amplitude de variação angular em azimute), duração de movimentação (em número de iterações) e instante de início (em número de iterações). Cada um dos conjuntos é aplicado uma única vez durante o intervalo de 25000 iterações buscando representar as movimentações de um veículo em que a rede estaria instalada. O posicionamento considerado tem a rede de antenas no plano XY com o ângulo de elevação crescente do eixo Z até o plano XY e o de azimute como rotação positiva no eixo Z.

VI. RESULTADOS

Os resultados das simulações, considerados mais expressivos, são apresentados abaixo, Fig. 2 a 8. Cada resultado é apresentado com a sua respectiva amplitude de movimentação angular em elevação e azimute bem como com sua duração em número de iterações e o instante de simulação em que inicia.

Nas Fig. 2, 3, 4, 7 e 8 pode-se observar que o comportamento do algoritmo DS-ACVP tende a acompanhar o comportamento do algoritmo LCMV com uma diferença de SER muito baixa para o caso estático. Nos dois casos instantâneos e nos casos com variação conjunta de θ e ϕ este acompanhamento ainda ocorre, pelo menos até o final da movimentação, com o algoritmo de projeções convergindo em um patamar de SER mais alto ao final da simulação.

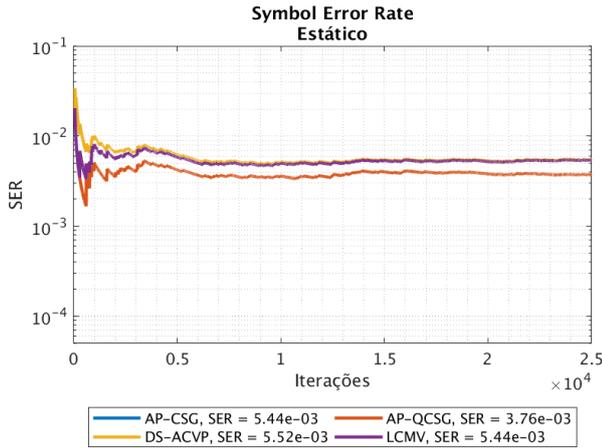


Fig. 2: Curvas de SER dos algoritmos em cenário estático.

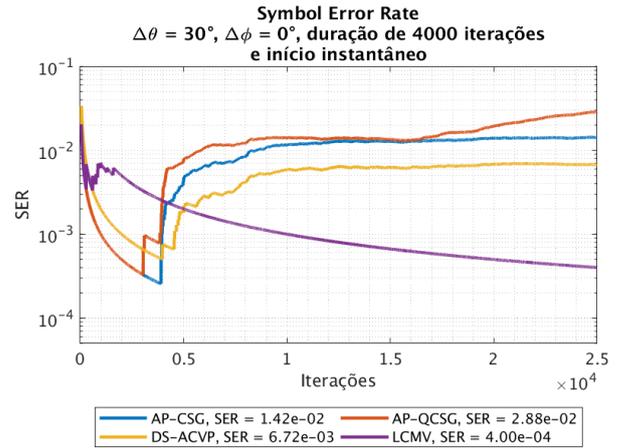


Fig. 5: Curvas de SER dos algoritmos em cenário com movimentação lenta em elevação e início instantâneo.

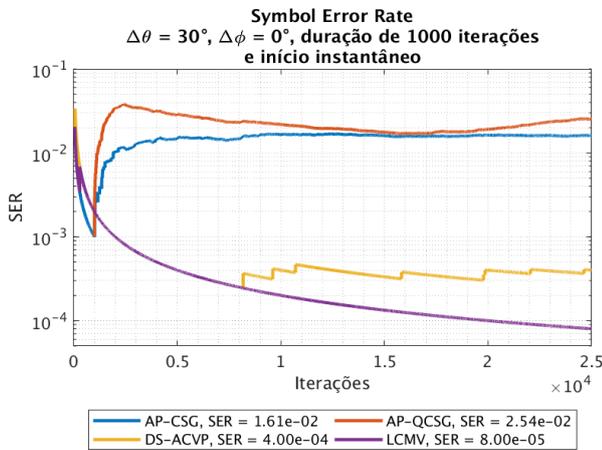


Fig. 3: Curvas de SER dos algoritmos em cenário com movimentação rápida em elevação e início instantâneo.

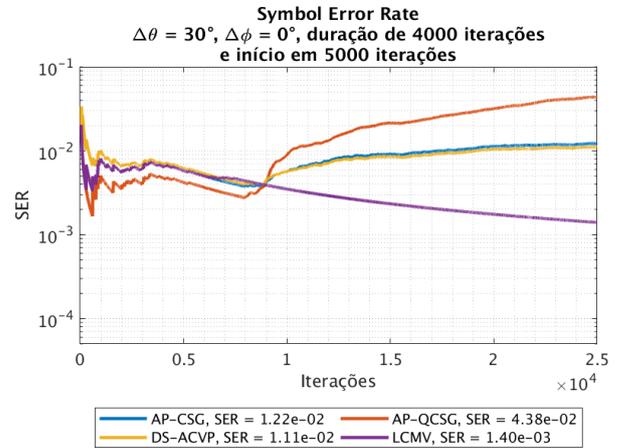


Fig. 6: Curvas de SER dos algoritmos em cenário com movimentação lenta em elevação e início após convergência.

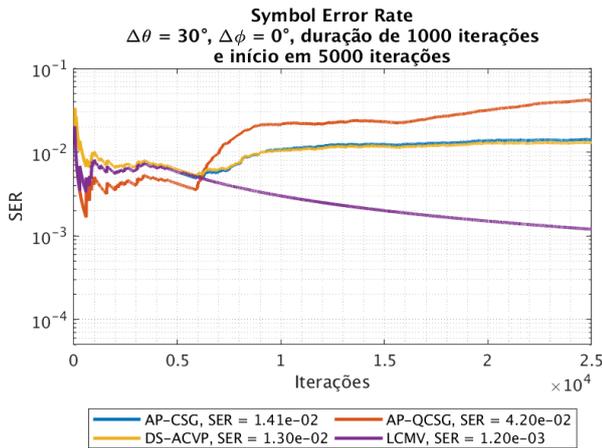


Fig. 4: Curvas de SER dos algoritmos em cenário com movimentação rápida em elevação e início após convergência.

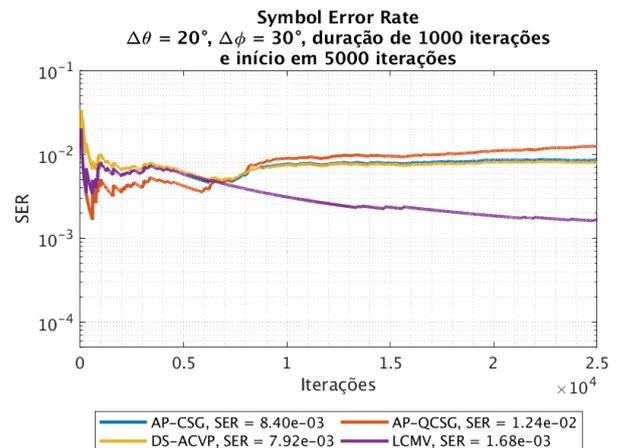


Fig. 7: Curvas de SER dos algoritmos em cenário com movimentação rápida em elevação e azimute e início após convergência.

Comparando as Fig. 3 e 4 e as Fig. 5 e 6 percebe-se que os algoritmos AP-CSG, AP-QCSG e DS-ACVP sofrem uma maior degradação de desempenho com um aumento na duração das movimentações. Fato este que não se verifica no algoritmo LCMV, com um desempenho aproximado nos dois tipos de movimentação considerados, rápida e lenta.

Por fim, comparando os casos em que a movimentação inicia após a convergência, Fig. 4, 6, 7 e 8 percebe-se a maior sensibilidade dos algoritmos quanto a movimentações em elevação do que quanto a movimentações em azimute.

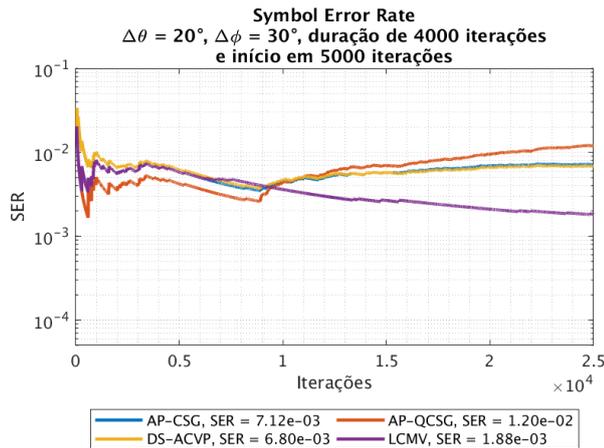


Fig. 8: Curvas de SER dos algoritmos em cenário com movimentação lenta em elevação e azimute e início após convergência.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que os algoritmos AP-CSG, AP-QCSG e DS-ACVP apresentam uma menor sensibilidade quando a mudança de direção é feita de forma rápida. Por outro lado, quando a alteração é lenta, estes algoritmos tendem a não garantir separação adequada do SOI. Este pode ser uma limitação para seu uso em cenários V2X, em que se esperam que as variações de DOA a todo momento.

VII. CONCLUSÕES

Com as simulações realizadas avaliaram-se as sensibilidades a movimentações de três algoritmos de conformação de feixe supervisionados que visam otimizar a SINR do sinal desejado e compará-los ao algoritmo com restrições, LCMV, operando em condições ideais (DOA do SOI conhecido a todo instante).

Observa-se sua maior sensibilidade a movimentações em elevação do que em azimute, explicada pelo posicionamento da rede e pela Eq. 3, com as duas parcelas de somatórios, dependentes de $\sin\theta_m$, diretamente proporcionais ao ângulo θ_m e a primeira parcela, dependente de $\cos\phi_m$, inversamente proporcional e a segunda, dependente de $\sin\phi_m$, diretamente proporcional ao ângulo ϕ_m . Também pode-se observar uma maior sensibilidade dos algoritmos AP-CSG, AP-QCSG e DS-ACVP a movimentações de maior duração indicativa de uma falta de robustez nos algoritmos mais atuais.

Dando continuidade a estes estudos, os autores veem como necessário aumentar a abrangência dos algoritmos estudados, investigar as causas dos problemas de desempenho apresentados e propor soluções para sua mitigação.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] J. Peisa. (set. de 2017). 5G techniques for ultra-reliable and low latency communication, Ericsson, endereço: http://cscn2017.ieee-cscn.org/files/2017/08/Janne_Peisa_Ericsson_CSCN2017.pdf (acesso em 23/04/2019).

[2] METIS, “Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system”, ICT-317669 METIS project, rel. técn., mai. de 2013.

[3] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta e P. Popovski, “Five disruptive technology directions for 5G”, *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, pp. 74–80, fev. de 2014.

[4] “5G americas white paper: Cellular V2X communications towards 5G”, 5G Americas, rel. técn., mar. de 2018.

[5] C. A. Balanis e P. I. Ioannides, *Introduction to Smart Antennas*, 1ª ed. Morgan & Claypool Publishers, 2007.

[6] R. W. Heath, N. González-Prelcic, S. Rangan, W. Roh e A. M. Sayeed, “An overview of signal processing techniques for millimeter wave mimo systems”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, v. 10, n. 3, pp. 436–453, abr. de 2016.

[7] D. N. Godard, “Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 28, n. 11, pp. 1867–1875, dez. de 1980.

[8] S. Talwar, M. Viberg e A. Paulraj, “Blind separation of synchronous co-channel digital signals using an antenna array. i. algorithms”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 44, n. 5, pp. 1184–1197, mai. de 1996.

[9] J. H. Winters, “Smart antennas for wireless systems”, *IEEE Personal Communications*, v. 5, n. 1, pp. 23–27, fev. de 1998.

[10] O. L. Frost III, “An algorithm for linearly constrained adaptive array processing”, *Proceedings of the IEEE*, v. 60, n. 8, pp. 926–935, ago. de 1972.

[11] H. Hung, S. Chang, S. Chen e C. Chang, “Real time implementation of frost beamformer for underwater communications”, *Journal of Marine Science and Technology*, v. 7, n. 1, pp. 1–7, jun. de 1999.

[12] C. A. Pitz, E. L. O. Batista e R. Seara, “On the joint beamforming and power control in cellular systems: Algorithm and stochastic model”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 13, n. 12, pp. 6943–6954, dez. de 2014.

[13] —, “A quadratically constrained stochastic gradient algorithm for beamforming in mobile communications”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, v. 65, n. 1, pp. 125–129, jan. de 2018.

[14] R. N. G. Robert, C. A. Pitz e R. Seara, “Conformação de feixe baseada em combinações lineares de projeções vetoriais”, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, pp. 196–200, set. de 2018.

[15] R. Roy, A. Paulraj e T. Kailath, “Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques - esprit”, em *MILCOM 1986 - IEEE Military Communications Conference: Communications-Computers: Teamed for the 90's*, vol. 3, out. de 1986, pp. 41.6.1–41.6.5.

[16] R. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 34, n. 3, pp. 276–280, mar. de 1986.