

Sobre a escolha de sinais em arranjos de microfones estimando DoA com GCC-PhaT

Izabela L. Freire, Paulo C. Prandel e José Antonio Apolinário Jr.

Resumo— Este artigo foi desenvolvido no contexto do problema de localização de atiradores pelos sinais sonoros associados ao disparo de uma arma de fogo, gravados por arranjos de microfones. As soluções do estado-da-arte envolvem a estimação de direção de chegada (DoA, *Direction of Arrival*) através de atrasos (TDoA, *Time Difference of Arrival*) calculados por algoritmos da família de correlação cruzada generalizada (GCC, *Generalized Cross-Correlation*). Tais atrasos podem ser utilizados em uma solução de minimização de erros quadráticos, especificamente pelo algoritmo de Mínimos Quadrados (LS, *Least Squares*), em que o parâmetro livre é a DoA. Apresenta-se aqui um algoritmo que visa melhorar a precisão das estimativas de DoA, através da seleção das estimativas de TDoA que são fornecidas ao método LS. O caráter do algoritmo é iterativo, a cada passo eliminando a TDoA que mais contribui para aumentar a energia do erro e recalculando então a DoA. Tal algoritmo é testado em dados de tiro e medidas que indicam aumento na precisão das estimativas de DoA são apresentadas. A técnica proposta é particularmente útil no caso de má qualidade do sinal devida à distância entre o atirador e o arranjo de microfones ou de perturbação do sinal original por suas reflexões ou por microfones defeituosos.

Palavras-Chave— Estimação da direção de chegada, arranjo de microfones, transformada de fase.

Abstract— This paper was developed in the context of the problem of *sniper location* by the audio signals associated to a gunshot event, recorded by *microphone arrays*. State-of-the-art solutions rely on estimation of *direction of arrival* (DoA) through delays (TDoA, *Time Difference of Arrival*) estimated by algorithms of the *Generalized Cross-Correlation* (GCC) family. These TDoAs can be used in a solution of *Least Mean Square Error*, specifically by the *Least Squares* (LS) algorithm in which the free parameter is the DoA. Here we present an algorithm aimed at increasing precision of estimates of DoA, through selection of TDoA estimates that are fed to the LS method. The algorithm is iterative, at each step eliminating the TDoA which most contributes to the error energy and recalculating the DoA. The algorithm is tested in gunshot data, and measurements indicating improvement in accuracy of DoA estimates are shown. The technique is particularly useful in case of bad quality of the recorded signals due to large distances between the sniper and the recording apparatus, of perturbations of TDoA estimates due to reflections, and of defective microphones in the array.

Keywords— Direction of arrival estimation, microphone array, phase transform.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo trata da estimação de direção de chegada (DoA, *Direction of Arrival*) de uma onda sonora através de um

Izabela L. Freire[†], Paulo C. Prandel[‡] e José A. Apolinário Jr.^{†‡}: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Defesa[†] (PGED) e Seção de Engenharia Elétrica[‡] (SE/3), Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro-RJ, Brasil, E-mails izabela.lyon.freire@gmail.com, pauloprandel@hotmail.com e apolin@ime.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, pelo CNPq (471230/2011-1) e pelo EB/DCT-GSI.

arranjo de microfones. Mais especificamente, o foco é na determinação de DoA de um sinal acústico de disparo de arma de fogo e como selecionar sinais a serem utilizados pelo algoritmo de DoA a fim de melhorar seu desempenho.

O problema de determinação de DoA de disparos de arma de fogo está em destaque no mundo e no Brasil, com aplicações militares e em segurança pública. No Brasil, foram recentemente instalados detectores de disparos de armas de fogo em Canoas-RS [1] e para a Copa do Mundo de 2014 e Olimpíadas de 2016 é planejada a instalação de mais detectores, no Rio de Janeiro [2].

Em aplicações militares, os arranjos espaciais de microfones (aquisições síncronas) são mais usuais; dois exemplos de geometria empregados são os arranjos poliédricos de 4 microfones do PILAR/OldB-Metravib [3] e o de 7 microfones do *Boomerang/BBN* [4].

No problema de análise de posicionamento de um atirador, temos em geral dois sinais a serem analisados: o *muzzleblast*, relativo à explosão da munição no cano da arma, e a *shockwave* ou onda de choque balística, gerada pelo projétil enquanto se desloca no espaço. São ambos sinais de áudio impulsivos e de banda-larga, o que determina algoritmos especializados para seu tratamento: nos métodos de determinação de DoA baseados na Diferença de Tempo de Chegada (TDoA) [5], para calcular a TDoA entre dois microfones é utilizado o método da Correlação Cruzada Generalizada (*Generalized Cross-Correlation*, GCC) [6], [7]. Com este método, para um arranjo de 4 microfones, sendo $C(n, k)$ o número de combinações de n elementos tomados k a k , teremos $C(4, 2) = 6$ pares de microfones e portanto 6 TDoA's. Para 7 microfones teremos $C(7, 2) = 21$ TDoA's. Uma questão que se coloca, ao analisar diferenças entre estes dois tipos de arranjos, é como melhorar os resultados quando estão disponíveis gravações realizadas por mais microfones; as possibilidades seriam: selecionar sinais gravados ou selecionar TDoAs geradas a partir de pares de sinais gravados. Em caso de defeito em um microfone, pode-se simplesmente eliminar o sinal daquele microfone, mas nem sempre é claro que uma gravação esteja pior que outras. Nem sempre é necessário melhorar as estimativas, mas em casos de *muzzleblast* gravado a grandes distâncias, a qualidade do sinal é ruim o suficiente para justificar tentativas de melhora. Note-se que o problema de localização de atiradores trata não somente o *muzzleblast* como também a onda de choque balística [8], cuja gravação apresenta outros problemas idiossincráticos como a potencial saturação dos microfones.

Neste artigo, é revisto um critério de minimização de Erro Quadrático Médio (EQM) entre TDoAs observadas e

preditas por um algoritmo de estimação de direção de chegada já aplicado com sucesso a um arranjo de 4 microfones na determinação de DoA de sinais de disparo de arma de fogo [5]. Em seguida, é apresentado um algoritmo iterativo que elimina, a cada iteração, a TDoA que mais contribui para o EQM; este algoritmo é aplicado a sinais gravados por um arranjo de 7 microfones, concluindo-se que a seleção de sinais é efetiva na diminuição do EQM e que o método iterativo proposto para escolha de sinais de TDoA é superior a uma seleção aleatória de um mesmo número de sinais.

O algoritmo é aplicado aos dados de *muzzleblast* e dados indicando melhora na precisão das medidas de DoA são apresentadas.

II. A TÉCNICA PROPOSTA

Antes de apresentar a técnica proposta neste artigo, façamos um breve resumo sobre a estimação de direção de chegada usando TDoAs obtidos por meio da correlação cruzada GCC-PhaT. Nosso interesse é a estimação dos ângulos ϕ (azimute) e θ (ângulo rasante ou 90° - ângulo de elevação).

A. Cálculo da DoA

O cálculo da DoA Seja $x_n(k)$ o sinal digital gravado pelo microfone n de um arranjo. Sendo a correlação cruzada entre $x_i(k)$ e $x_j(k)$ definida como $\hat{r}_{x_i x_j}(\tau) = E[x_i(k)x_j(k-\tau)]$, pode-se escrever $\hat{r}_{x_i x_j}(\tau) = \sum_{-\infty}^{\infty} x_i(k)x_j(k-\tau) = x_i(\tau) * x_j(-\tau)$.

Levando-se em conta a definição da densidade espectral de potência (PSD) $R_x(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{r_x(\tau)\}$, pode-se estimar a densidade espectral de potência cruzada entre $x_i(k)$ and $x_j(k)$ como $\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{\hat{r}_{x_i x_j}(\tau)\} = \mathcal{F}\{x_i(\tau) * x_j(-\tau)\} = X_i(e^{j\omega})X_j^*(e^{j\omega})$, o que corresponde a $X_i(e^{j\omega})X_j^*(e^{j\omega})$ se $x_j(k)$ é real. Portanto, a correlação cruzada entre $x_i(k)$ and $x_j(k)$ pode ser escrita como

$$\hat{r}_{x_i x_j}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega})\}. \quad (1)$$

A correlação cruzada generalizada entre sinais dos microfones i e j é definida como [6]

$$\hat{r}_{x_i x_j}^G(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\psi(\omega)\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega})\}, \quad (2)$$

onde a função de ponderação de frequências $\psi(\omega)$ é introduzida com o intuito de melhorar a estimativa do retardo temporal; os pesos usados pelo GCC-PhaT são dados por:

$$\psi(\omega) = \frac{1}{|\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega})|}. \quad (3)$$

Para cada par de microfones i e j , o TDoA entre as frentes de onda do sinal é estimado por

$$\tau_{ij} = \arg \max_{\tau} r_{x_i x_j}^G(\tau). \quad (4)$$

Uma vez obtidas as TDoAs (em número de amostras) τ_{ij} , obtemos $\bar{\tau}_{ij} = \tau_{ij}/f_s$, o atraso em segundos entre os microfones i e j . Considerando o vetor unitário $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$ na direção de propagação da onda sonora,

$$\mathbf{a}_{\theta, \phi} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi & -\cos \theta \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

podemos escrever a distância percorrida pelo som $d_{ij} = \mathbf{a}_{\theta, \phi}^T \mathbf{p}_i - \mathbf{a}_{\theta, \phi}^T \mathbf{p}_j$, tal que $\bar{\tau}_{ij} = d_{ij}/v_{som} = \mathbf{a}_{\theta, \phi}^T \Delta \mathbf{p}_{ij}$, onde $\Delta \mathbf{p}_{ij} = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)/v_{som}$, \mathbf{p}_i e \mathbf{p}_j representando as coordenadas dos microfones.

Para encontrarmos a direção de chegada (ângulos θ e ϕ das componentes do sinal de tiro), adotamos uma abordagem de minimização de Erro Quadrático Médio (EQM) ¹ minimizamos, com respeito a $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$, uma função custo com a média dos quadrados dos erros:

$$\xi(\theta, \phi) = \frac{1}{N} \sum (\bar{\tau}_{ij} - \Delta \mathbf{p}_{ij}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi})^2 \quad (6)$$

correspondentes às diferenças quadradas entre os atrasos reais e preditos, dada uma direção de chegada (θ, ϕ) de pares i, j de microfones, onde N é o número total de pares participantes da promediação.

Tomando o gradiente de (6) em relação a $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$ e igualando o resultado a zero, obtemos

$$\mathbf{a}_{DoA} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}, \quad (7)$$

onde

$$\mathbf{A} = \Delta \mathbf{p}_{12} \Delta \mathbf{p}_{12}^T + \dots + \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N} \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N}^T, \quad \mathbf{e} \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = \bar{\tau}_{12} \Delta \mathbf{p}_{12} + \dots + \bar{\tau}_{(N-1)N} \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N}. \quad (9)$$

Assumindo $\mathbf{a}_{DoA} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$, o ângulo rasante ($\pi/2$ - elevação) é dado por

$$\theta = \cos^{-1} a_z \quad (10)$$

enquanto o azimute da DoA é dado por

$$\phi = \tan^{-1} a_y/a_x. \quad (11)$$

A motivação para este artigo veio do fato de nem todos sinais contribuírem para um bom resultado: podemos citar, como exemplo, uma situação onde um dos microfones encontra-se com mau contato ou ainda quando a reflexão causada por um muro poderia deixar, devido à geometria do arranjo, um microfone com o sinal refletido com maior intensidade que o sinal direto. Nestes casos, escolher os sinais, ou, mais especificamente, as correlações, com as quais efetuaremos a minimização conduzirá a um resultado mais preciso.

B. Seleção de pares de microfones para fornecimento de TDoA's

A fim de selecionar pares ij de microfones a serem utilizados no cômputo da DoA, foi proposto o algoritmo aqui denominado de Erro Quadrático Médio Iterativo (EQMI), em que iterativamente o par de microfones que mais contribui para o custo (6), ou seja, aquele com maior $(\bar{\tau}_{ij} - \Delta \mathbf{p}_{ij}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi})^2$ é eliminado dos cálculos, re-avaliando-se o custo a cada iteração. Este processo é sumarizado no pseudocódigo abaixo.

¹Chamamos aqui de EQM a expressão em (6), usualmente conhecida como a função custo dos Mínimos Quadrados ou LS, de *Least Squares*. Não confundir com MSE, ou *Mean Square Error*, definida como $E[e^2]$, o valor esperado do quadrado do erro.

Data: Um conjunto \mathcal{S} de N sinais de áudio gravados por um arranjo de N microfones

Result: DoA (θ, ϕ) da fonte sonora

Seja \mathcal{P} o conjunto de todos os possíveis pares de microfones. Aqui, $|\mathcal{P}|$, o número de elementos em \mathcal{P} , é $N(N-1)/2$;

while $|\mathcal{P}| \geq 6$ **do**

EQMI.a. Obter, do conjunto \mathcal{P} , uma estimativa (θ, ϕ) de DoA, de acordo com as equações (10) e (11).

EQMI.b. A partir da estimativa (θ, ϕ) obtida no passo anterior, calcular, para cada par $p_{i,j}$ de microfones m_i e m_j de \mathcal{P} , sua contribuição para o MSE, Eq. (6), como $(\bar{r}_{ij} - \Delta \mathbf{p}_{ij}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi})^2$.

EQMI.c. O par $p_{i,j}$ com a maior contribuição para o MSE é permanentemente eliminado dos cálculos:

$\mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} - p_{i,j}$;

end

return (θ, ϕ) correspondente à iteração de MSE mínimo;

Algorithm 1: O algoritmo EQMI aplicado ao problema de DoA.

C. Seleção de microfones

Em aplicações práticas um dos possíveis problemas com o sinal gravado é a falha de um dos sensores. A utilização recursiva do algoritmo iterativo, pela função *EQMIR*, permite a eliminação de microfones do cálculo. O procedimento é chamar recursivamente o algoritmo EQMI com um conjunto de microfones que é um subconjunto da chamada anterior, com a eliminação de um microfone por recursão. Um microfone é eliminado sempre que aparece menos que n vezes em uma iteração do EQMI. Conta-se como uma aparição cada par em que o microfone esteja presente. Sugerimos aqui utilizar $n = 2$. O pseudocódigo é apresentado abaixo.

Data: Um conjunto \mathcal{S} de M sinais de áudio gravados por um arranjo de microfones

Result: DoA (θ, ϕ) da fonte sonora

Seja \mathcal{P} o conjunto de todos os possíveis pares de microfones de \mathcal{S} . Aqui, $|\mathcal{P}|$, o número de elementos em \mathcal{P} , é $N(N-1)/2$;

while $|\mathcal{P}| \geq 6$ **do**

EQMI.a;

EQMI.b;

EQMI.c;

if Algum microfone m_i aparece menos que n vezes em \mathcal{P} **then**

return EQMIR($\mathcal{S} - m_i$);

end

end

return (θ, ϕ) correspondente à iteração de MSE mínimo;

Algorithm 2: O algoritmo EQMIR aplicado ao problema de DoA.

III. SOBRE O ARRANJO E A BASE DE DADOS

O arranjo espacial de microfones utilizado é mostrado na Fig. 1 onde visualiza-se o vetor na direção de propagação da

onda sonora, $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$. Em nossos experimentos, os sinais de um disparo são coletado pelos microfones do arranjo e digitalizados por um conversor analógico-digital (A/D) multicanal de 24 bits, o PreSonus FIREPOD. Os microfones empregados são da marca Behringer, modelo ECM8000.

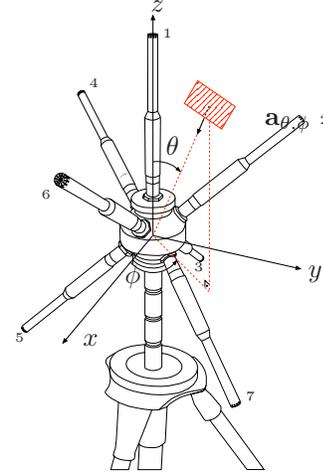


Fig. 1. O arranjo espacial de 7 microfones. O vetor $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$ é unitário e na direção de propagação da onda sonora.

Uma base de dados foi adquirida no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), onde foram gravados sinais de diversos armamentos em diferentes posições. Utilizamos, na análise aqui apresentada, dezesseis disparos com o FAL (Fuzil Automático Leve 7,62mm M964 fabricado pela IMBEL) realizados a duas diferentes distâncias do arranjo de microfones: oito disparos a 236 e outros oito a 468 metros. Os sinais foram recortados manualmente para processamento *off-line* pelos algoritmos de estimação de DoA.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

São reportados dois resultados experimentais: o da aplicação do método EQMI a sinais da base de dados apresentados acima, buscando melhorar a estimativa de DoA, por um lado, e por outro, a definição de qual seria um bom número de pares a ser usado. Em outro experimento, sinais de alguns microfones são artificialmente corrompidos (substituídos por ruído branco) e investiga-se o desempenho do método proposto em tais casos.

A. Seleção de pares

O método EQMI foi aplicado a 8 exemplares de *muzzleblast* de tiro de FAL gravados a 236m do local de disparo e 8 gravados a 468m do local de disparo. As DoA's foram calculadas levando-se em conta os resultados da interpolação da função de correlação apresentados em [5]. Como é mostrado na Fig. 2, os resultados de cada um desses casos são comparados, mostrando que a 468m o EQM é sempre mais alto do que a 236m, com desvio padrão também maior, indicando deterioração do desempenho do algoritmo de determinação de DoA com queda na qualidade do sinal. Contudo, com a seleção de pares, essa diferença na média é diminuída ao mesmo tempo em que o EQM cai, indicando que a seleção de pares compensa alguns

aspectos da perda de qualidade do *muzzleblast* com a distância; isto permite melhoras no caso mais crítico de localização do atirador que é aquele em que ele se encontra longe do arranjo de sensores.

Valores de azimute e elevação ao longo das iterações são mostrados nas Figs. 3 e 4. Note-se que o eixo horizontal apresenta o número de microfones, na ordem reversa da ordem temporal das iterações.

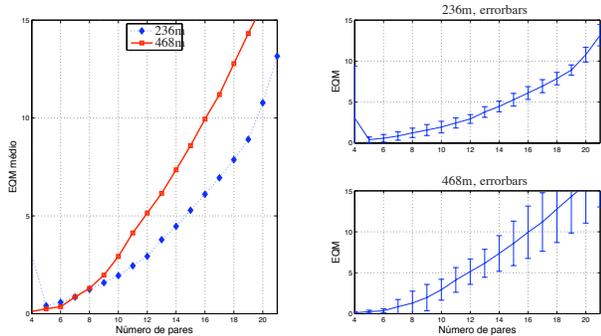


Fig. 2. À esquerda, a média, para os sinais analisados, do EQM da Eq. (6). Nos gráficos à direita, mostra-se também o desvio-padrão, que é maior para os disparos realizados a 468m do arranjo, indicando deterioração das medições: ou do algoritmo de determinação de DoA.

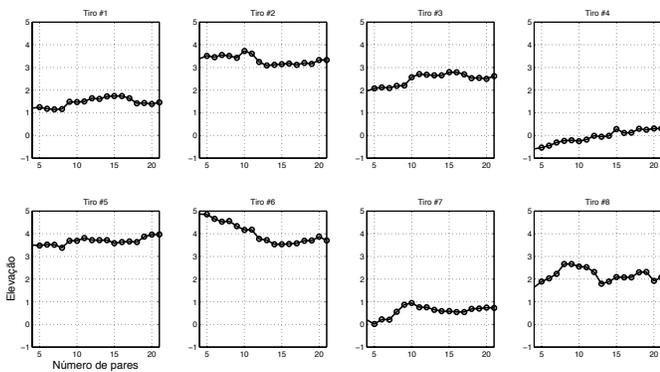


Fig. 3. Variação da elevação com o número de pares selecionados, para os disparos realizados a 468m do arranjo.

Observando-se a Fig. 2 e as variações de DoA mostradas nas Figs. 3 e 4, assim como uma intenção de não sobre-selecionar, optamos por selecionar 6 pares de microfones.

Ao analisar os resultados do algoritmo EQMI para a busca de 6 pares de microfones visando minimizar-se o EQM, estes foram comparados aos de seleções aleatórias de pares. Como nosso maior interesse é o caso do *muzzleblast* longínquo, analisamos os sinais de tiros disparados a 468m, combinações aleatórias de 6 pares de microfones e tais foram alimentadas ao algoritmo de DoA, obtendo-se o histograma mostrado na Fig. 5. Podemos inferir que o processo iterativo de remoção de pares diminui o EQM eficientemente pois seus valores de EQM em torno de 0.35 enquanto que o uso de todos os 21 pares disponíveis dá uma média de 18.9. Para seleções aleatórias, conforme observado na Fig. 5, encontramos, em sua grande maioria, valores piores (com maior EQM) que os

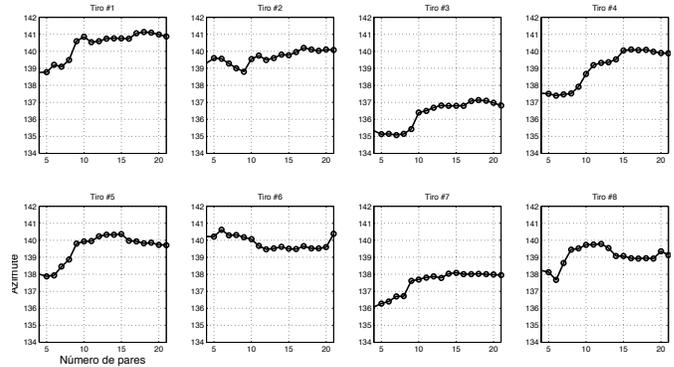


Fig. 4. Variação do azimute com o número de pares selecionados, para os disparos realizados a 468m do arranjo.

obtidos pelo método iterativo proposto. A Fig. 5 demonstra que a diminuição do EQM ao longo das iterações é função do processo de seleção de pares e não simplesmente da diminuição do número de pares utilizados nos cálculos.

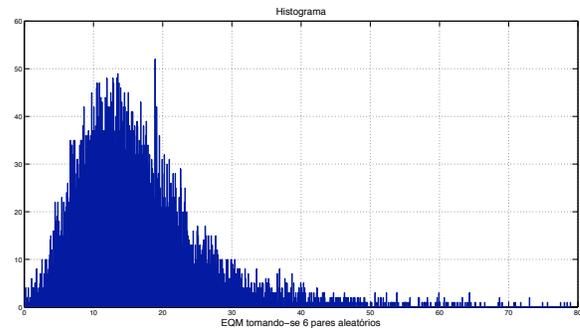


Fig. 5. Histograma do EQM calculado a partir de 6 pares aleatórios, para os tiros gravados a 468m do local de origem. O arranjo empregado possui 7 microfones.

Para avaliar o erro de posicionamento do atirador que é compensado pela seleção de pares, considerando a Lei dos Cossenos, $c^2 = a^2 + b^2 - 2 * a * b * \cos\gamma$, onde a , b e c são lados de um triângulo e γ é o ângulo oposto a c , conclui-se que uma diferença de $\gamma = 2$ graus na estimativa de DoA de um objeto situado a 500m de distância equivale a 17.5m de diferença no posicionamento.

B. Simulação de seleção de microfones

O algoritmo EQMI foi aplicado à seleção de microfones em casos em que um, dois ou três dos sete sinais originais eram corrompidos pela substituição por ruído branco. Em testes com a base de dados de 8 sinais gravados a 468m, o método EQMI foi bem-sucedido para todos os casos de remoção de até dois sinais, mas em um dos casos de remoção de três sinais houve falha em selecionar os sinais não-corrompidos.

A estes casos de remoção de três sinais foi então aplicado o método recursivo, para as bases de dados gravados a 300 e a 468m, com sucesso para remoção de até três dos sinais, evidenciado em primeiro lugar pela observância da seleção correta dos microfones corrompidos e em segundo

pelos valores de azimute e elevação calculados pelos 4 sinais restantes, dados, no formato (mínimo,máximo,média,desvio-padrão) de (137.02, 44,89,140.28,2.28) e (-0.2,4.9,2.9,1.73) para azimute e elevação de tiros disparados a 468m do arranjo e (-0.16,2.57,1.33,0.89) e (156.98, 159.9,158.9,1.02) para azimute e elevação de tiros disparados a 236m do arranjo.

Os resultados mostrados nas Figs 7 e 8 correspondem aos erros, em relação aos valores encontrados para seleção de 6 pares com total disponibilidade inicial de sinais, de azimute e elevação, respectivamente. Dos casos analisados, apenas em um exemplar de tiro (#5) onde, assumindo a corrupção dos sinais de três microfones, a DoA não foi recuperada - e em tal caso, analisando-se a seleção de pares realizada, nota-se que apenas um par em que figuravam sinais corrompidos se manteve na seleção final de 6 pares; ainda assim, houve erro muito grande na estimação de DoA.

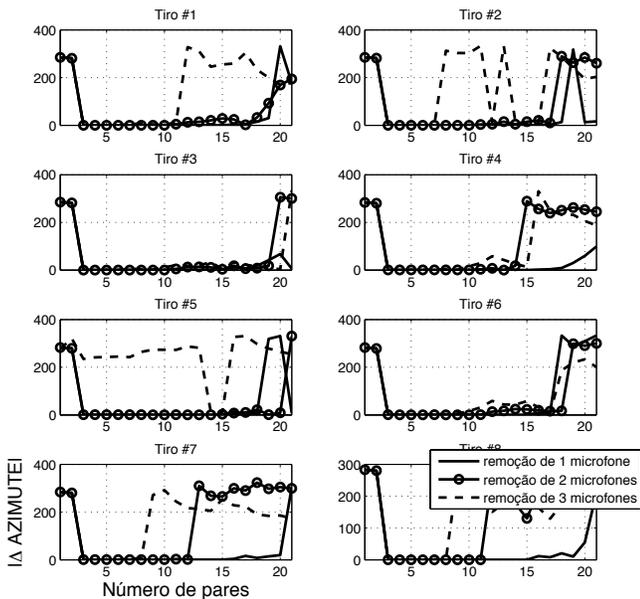


Fig. 6. Diferença absoluta de azimute, calculada por EQMI, entre o caso com todos os sinais inicialmente disponíveis e eliminando 1, 2, ou 3 microfones pela substituição do sinal por ruído branco. Note a concordância observada aos 6 pares, que, pela seção anterior, é um bom número de pares a ser selecionado. Dados do tiro a 236m.

V. CONCLUSÕES

Concluímos portanto que a seleção de pares de microfones por EQMI diminui o EQM correspondente à DoA estimada. Nota-se que a melhora no desempenho é mais aguda para o caso mais difícil de *muzzleblast* a 468m dos sensores que para o caso de *muzzleblast* a 236m dos sensores, indicando uma real compensação da queda na qualidade do sinal que chega ao arranjo. Estas discussões tomam por hipótese que a função de custo proposta esteja correta; contudo, observamos que tal avaliação é auto-referente, buscando portanto apenas coerência interna. Já foi demonstrado, porém, que o algoritmo funciona bem no arranjo tetraédrico (que possui portanto $C(4,2)=6$ pares de microfones). A análise da seleção aleatória mostra que é

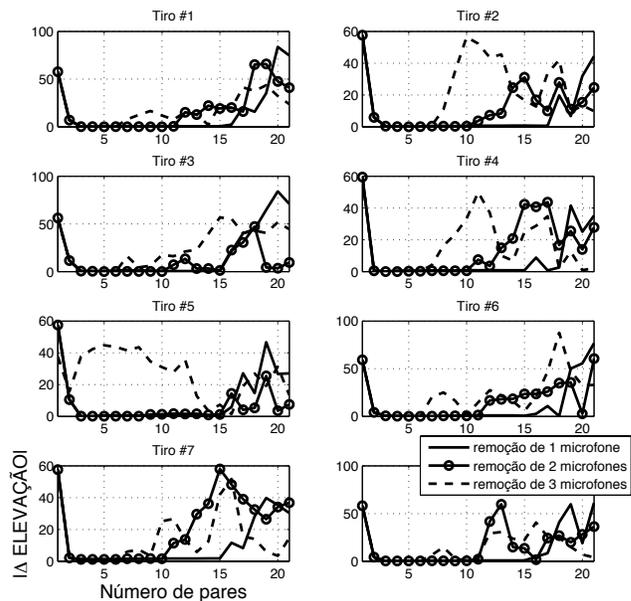


Fig. 7. Análogo à figura anterior, para elevação.

melhor gravar mais sinais e descartar vários deles do que simplesmente tomar os sinais em apenas 4 posições a fim de se ter 6 pares, demonstrando que um arranjo de 7 microfones oferece vantagens em relação a um arranjo de 4 microfones, especialmente no caso de *muzzleblast* distante. Concluímos ainda que, em caso de corrupção de sinais de até 3 dos 7 microfones, o método EQMI é eficaz para a seleção de microfones, indiretamente através da seleção de pares.

REFERÊNCIAS

- [1] "Sistema detector de tiros ajuda polícia a prender bandidos em Canoas", *Rede Bandeirantes*, Outubro 2010. [online](http://www.band.com.br/noticias/cidades/noticia/?id=100000355998) <http://www.band.com.br/noticias/cidades/noticia/?id=100000355998>
- [2] "Copa levará sistema de detecção de tiros para entorno do Maracanã", *Rede Bandeirantes*, Outubro 2010. [online](http://www.band.com.br/noticias/cidades/noticia/?id=100000355999) <http://www.band.com.br/noticias/cidades/noticia/?id=100000355999>
- [3] J. Millet and B. Baligand, "Latest achievements in gunfire detection systems," *Proc. RTO-MP-SET-107 Battlefield Acoustic Sensing for ISR Applications*, Neuilly-sur-Seine, France, October 2006.
- [4] J. A. Mazurek, J. E. Barger, M. Brinn, R. J. Mullen, D. Price, S. E. Ritter and D. Schmitt "Boomerang mobile counter shooter detection system," *SPIE International Symposium on Defense and Security*, Orlando, USA, March-April 2005.
- [5] I. L. Freire and J. A. Apolinário Jr., "DoA of gunshot signals in a spatial microphone array: performance of the interpolated Generalized Cross-Correlation method," *Proceedings of the 5th Argentine Conference on Micro-Nanoelectronics, Technology, and Applications (CAMTA 2011)*, Buenos Aires, Argentina, August 2011.
- [6] C. Knapp and G. Carter, "The Generalized Correlation method for estimation of time delay," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, August 1976.
- [7] I. L. Freire and J. A. Apolinário Jr., "GCC-based DoA Estimation of Overlapping Muzzleblast and Shockwave Components of Gunshot Signals", *Proceedings of the 2nd IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS 2011)*, Bogotá, February 2011.
- [8] I. L. Freire and J. A. Apolinário Jr., "Localização de atirador por arranjo de microfones", *Anais do X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2011)*, São João del Rey, September 2011.