

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho/1792)
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

Juliano Garcia do Carmo Ribeiro

Localização de direção de chegada a partir de sinais acústicos capturados de um drone

**Rio de Janeiro
Outubro de 2017**

Instituto Militar de Engenharia

Juliano Garcia do Carmo Ribeiro

**Localização de direção de chegada a partir de sinais acústicos
capturados de um drone**

Projeto Final de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia.

Orientador: José Antonio Apolinário Junior

**Rio de Janeiro
Outubro de 2017**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha
Rio de Janeiro-RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

666.555 Ribeiro, Juliano Garcia do C.

S455h Localização de direção de chegada a partir de sinais acústicos capturados de um drone / Juliano Garcia do Carmo Ribeiro ; orientados por José Antonio Apolinário Junior - Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017.

56p. : il.

Projeto de Fim de Curso (PFC) - Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2017.

1. Curso de engenharia eletrônica - Projeto Final de Curso. 2. Processamento de Sinais I. title. II. Instituto Militar de Engenharia.

Instituto Militar de Engenharia

Juliano Garcia do Carmo Ribeiro

**Localização de direção de chegada a partir de sinais acústicos
capturados de um drone**

Projeto Final de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia.

Orientador: José Antonio Apolinário Junior

Aprovado em 06 de Outubro de 2017 pela seguinte Banca Examinadora:

José Antonio Apolinário Junior - DSc
COPPE/UFRJ, do IME
Orientador

Nelson Antônio Borges Garcia - D.C., E.C.
Lyon, do IME

André Luís Sousa de Araújo - M.C. do IME

Rio de Janeiro
Outubro de 2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Instituto Militar de Engenharia, em especial o corpo docente da SE/3, por me fornecer educação de qualidade e a oportunidade de aplicar meus conhecimentos.

À minha família por sempre me fornecer apoio e sustento durante meus 3 anos de cursinho, meu pai por sempre manter o bom humor enquanto me assegurava que eu estava no caminho certo e minha mãe pelo esforço descomunal que ela sempre exerceu para manter as nossas vidas em ordem, com carinho e dedicação ilimitados.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Apolinário, por despertar em mim um interesse pela pesquisa, por me guiar pacientemente ao longo do ano, por me dar a oportunidade de ver meu esforço tomando forma e por me fazer experimentar e contribuir para o mundo acadêmico. Por ministrar aulas interessantes que nos permitiam entender os resultados e conceitos de forma didática e informativa, sempre com o bom humor e disposição.

Ao Professor Nelson por me ajudar a expressar minha paixão pela matemática tanto na sala de aula quanto fora, nas competições para as quais viajamos juntos. Por me orientar no meu Trabalho Dirigido, onde eu tive meu primeiro contato com a área de processamento de sinais, que se tornou a minha área de interesse.

Ao Major André Araújo por todo o esforço que ele sempre colocou na formação de seus alunos e pelas nossas conversas no corredor sobre os vários ramos da Matemática, desde a geometria até a Matemática financeira.

Ao Coronel Cerqueira, por ter sido um grande Professor de Cálculo e um ombro amigo. Por me convencer a permanecer no IME no meu primeiro ano e sempre demonstrar prontidão e determinação para ajudar seus alunos, ao ponto de me oferecer uma aula de marcha quando descobriu minha completa ineptidão no assunto.

À toda equipe do LPDS, ao técnico Jorge Paulo do Bomfim por prontamente auxiliar com a execução dos experimentos, ao Tenente Felipe Serrenho por suas colaborações aos trabalhos e pelo sentimento de camaradagem desenvolvido acertando a formatação de Latex por um tempo muito acima do razoável. Ao Rigel Fernandes e ao Major Carlos Valim, por sempre estarem dispostos a prestar auxílio e tornar a convivência no laboratório agradável.

Agradeço aos profissionais da SE/6, o Capitão R/1 Eduardo e o Subtenente Marco, por nos acompanhar nos experimentos em campo e prestar suporte com o equipamento cartográfico para obter medidas precisas.

Agradeço à EMGEPRON, em especial ao CMG R/1 Silva Souza, por nos auxiliar nos experimentos de localização de fonte fornecendo o local e os meios de fazer a pesquisa.

Resumo

O presente trabalho objetiva a determinação da Direção de Chegada (*Direction of Arrival*, ou DoA) de sinais acústicos impulsivos a partir do processamento de gravações capturadas de um drone [1] utilizando um arranjo de microfones plano. Experimentos feitos em conjunto com a Empresa de Gerenciamento de Projetos Navais (EMGEPRON) [2] objetivando localização de fonte sonora através do uso de 3 arranjos também são explorados [13][11]. Por se tratar de sinais acústicos, seja os sinais relativamente limpos dos arranjos estacionários ou os sinais altamente ruidosos das hélices no caso do drone, os métodos de tratamento Recorte do Sinal (*Signal Clipping*, ou SC) [11] e da Filtragem Mediana (*Median Filtering*, ou MF) [6] são aplicados nos sinais para eliminar problemas de multipercurso e melhorar sua Relação Sinal Ruído (Signal to Noise Ratio, ou SNR). É desenvolvido um método de determinação de DoA para o caso bidimensional (plano) baseado nos métodos explorados e aprimorados para o caso espacial. São realizadas simulações e são feitos experimentos práticos para testar a precisão dos métodos. É proposto um algoritmo de generalização de um método de seleção de dados previamente conhecido, o Busca Exaustiva (*Exhaustive Search*, ou ES) [5] e são feitas adaptações à aprimoração da determinação de DoA restringindo esta à norma unitária para o caso plano baseado no método espacial previamente estabelecido, a estimativa com Restrição Não-Linear (*Non-Linear Constrained estimation* ou NLC) [11].

Abstract

The present work aims to determine the Direction of Arrival (DoA) of impulsive acoustic signals by processing recordings captured from a drone [1] using a plane microphone array. Experiments realized in conjunction with the Naval Projects Management Company (EMGEPRON) [2] aiming at sound source localization using microphone arrays are also explored [13][11]. As the signals are of an acoustic nature, be it the relatively clean signals extracted from the stationary arrays or the heavily noised signals due to the propellers in the drone case, the treatment methods Signal Clipping (SC) [11] and Median Filtering (MF) [6] are applied on the signals to eliminate multipath issues and improve its Signal to Noise Ratio (SNR). A method to find the DoA for the plane case is developed based on methods explored and improved for the spatial case. Simulations and field experiments are done to test the precision of the methods. An algorithm that generalizes the known data selection method Exhaustive Search (ES) [5] is proposed and an adaptation is done for the improvement of the DoA determination restricted to the unit norm for the plane case based on the spatial method previously established, the Non-linear Constrained estimation (NLC) [11].

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	14
2.1	O experimento com o drone	14
2.2	O experimento com a EMGEPRON	16
2.3	Esquema de calibração	17
3	O TRATAMENTO DO SINAL	21
3.1	Recorte do Sinal	21
3.2	Filtragem Mediana	22
4	A DETERMINAÇÃO DAS DIFERENÇAS DE TEMPO ENTRE MI- CROFONES	24
5	A ESTIMATIVA DA DOA	26
5.1	Estimativa Padrão	27
5.2	Restrição não-linear	27
5.3	Métodos adaptados para o drone	29
6	BUSCA EXAUSTIVA	32
6.1	O Algoritmo	32
6.2	O problema do número de condicionamento	33
7	A LOCALIZAÇÃO DE FONTE	36
7.1	O método dos Mínimos Quadrados	37
7.2	O método dos Mínimos Quadrados Totais	38
8	RESULTADOS	39
8.1	Os experimentos com a EMGEPRON	39
8.1.1	Simulações	39
8.1.2	Experimento de campo	40
8.2	O experimento com o drone	43
8.2.1	Simulações	44
8.2.2	Experimento de campo	44
	Conclusão	49

Bibliografia	51
-------------------------------	-----------

ANEXOS	53
---------------	-----------

Lista de ilustrações

Figura 1 – Foto do drone Phantom 4 com as hastes de acrílico inclusas, tirada por Jorge Paulo do Bomfim.	14
Figura 2 – Figura ilustrativa da relação entre os eixos e os ângulos de varredura correspondentes.	18
Figura 3 – Desenho da configuração do experimento do esquema de calibração, feito por Jorge Paulo do Bomfim.	18
Figura 4 – Estimativa do ponto de disparo, em que cada ponto azul corresponde a uma estimativa.	19
Figura 5 – Aplicação dos métodos de SC e MF em um sinal de tiro gravado a 100 metros do nível do chão.	23
Figura 6 – Aplicação dos métodos de SC e MF em um sinal de tiro gravado pelo arranjo de 4 microfones estacionário no chão.	23
Figura 7 – Comparação dos métodos de GCC e GCC-PHAT em um sinal de tiro gravado a 100 metros do nível do chão.	25
Figura 8 – Imagem ilustrativa da DoA (figura utilizada com permissão do autor, J. A. Apolinário Jr.).	26
Figura 9 – Comparando custos com e sem NLC (republicada de [11] com a autorização dos autores).	29
Figura 10 – Histograma com os valores de condicionamento encontrados percorrendo todas as matrizes provenientes do arranjo de 4 microfones plano passando todos os números de pares de ES(3) at(6).	35
Figura 11 – Histograma com os valores de condicionamento encontrados percorrendo todas as matrizes provenientes do arranjo de 4 microfones espacial passando por todos os números de pares de ES(4) até ES(6).	35
Figura 12 – Histograma com os valores de condicionamento encontrados percorrendo todas as matrizes provenientes do arranjo de 7 microfones passando por todos os números de pares de ES(4) até ES(21). (a) são todos os condicionamentos, (b) são os condicionamentos <1000 e (c) são os condicionamentos ≥ 1000	35
Figura 13 – Encontros das retas determinadas pelas DoAs(republicada de [13] com a autorização dos autores).	36
Figura 14 – Estimação da posição de impacto de um projétil alto-explosivo (republicada de [11] com a autorização dos autores).	41

Figura 15 – Estimação da posição do canhão localizado na fábrica da EMGEPRON, em que: (a) é a estimativa com o NLC e a correção Cartográfica, (b) é o resultado sem o NLC e com a correção Cartográfica, (c) é a estimativa sem o NLC e com a correção via calibração e (d) é a estimativa com o NLC e com a correção via calibração (republicada de [11] com a autorização dos autores).	43
Figura 16 – Sinal de tiro comprometido, captado a 25 metros do chão destratado. .	46
Figura 17 – Estimativas de DoA nas diferentes alturas. (a) são as estimativas a 100 metros do chão, (b) a 50 metros do chão e (c) a 25 metros do chão. . .	47
Figura 18 – As alturas são estimadas com o ângulo de elevação e trigonometria simples.	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Arranjo dos microfones no drone (4 mics)	16
Tabela 2 – desempenho da estimativa de DoA usando o NLC (republicada de [11] com a autorização dos autores)	30
Tabela 3 – Posições utilizadas nas simulações de localização (Republicada de [13] com permissão dos autores)	38
Tabela 4 – Arranjos Lineares alinhados com o eixo x (Republicada de [13] com permissão dos autores)	38
Tabela 5 – Resultados da simulação com arranjo linear (republicado de [13] com autorização dos autores)	40
Tabela 6 – Resultados da simulação com arranjo espacial de 7 microfones (repu- blicado de [13] com autorização dos autores)	40
Tabela 7 – Resultados da simulação com arranjo espacial de 4 microfones (repu- blicado de [13] com autorização dos autores)	40
Tabela 8 – Posições dos 3 arranjos de microfones para o experimento da EMGE- PRON (republicado de [11] com autorização dos autores)	41
Tabela 9 – Coordenadas dos arranjos e suas correções (republicada de [11] com autorização dos autores)	42
Tabela 10 – Médias dos erros estimados na simulação	44
Tabela 11 – Desvios padrão dos erros estimados na simulação	44
Tabela 12 – Posições dos pontos de interesse em UTM	45
Tabela 13 – Calibração do drone para cada altura	45
Tabela 14 – Tabela com os resultados dos azimutes relativos ao Norte encontrados em graus	46
Tabela 15 – Tabela com os resultados dos ângulos de elevação estimados em graus .	47
Tabela 16 – Tabela com as estimativas de altura em metros	47

1 Introdução

O problema de determinar a direção de chegada de um sinal acústico impulsivo tem soluções consolidadas na literatura e possui várias aplicações práticas. Neste trabalho, será estimada a DoA a partir de sinais capturados de um drone dando atenção a todos os fatores únicos a este problema. Também são reportados os resultados da pesquisa de localização de fontes sonoras desenvolvida ao longo do ano [13][11].

O caso do drone é complicado por vários fatores: Os sinais capturados pelo drone foram contaminados pelo ruído das hélices girando e portanto tiveram de ser utilizadas técnicas de redução de ruído para melhorar a SNR dos sinais. Outro problema foi a geometria da disposição dos microfones: os microfones foram predispostos de forma plana, e portanto, os algoritmos utilizados até então tiveram de ser adaptados. Também houve problemas de conhecer a orientação do drone e sua posição com suficiente precisão.

A determinação da DoA é feita a partir do processamento do sinal acústico seguindo estes passos: inicialmente, o sinal é capturado pelo arranjo de microfones e as amostras de áudio de cada microfone são recebidas. Daí, o sinal passa pelas funções Recorte do Sinal (Signal Clipping, ou SC) [11] e Filtragem Mediana (Median Filtering, ou MF) em uma tentativa de melhorar sua SNR objetivando melhorar a precisão do método. Em seguida, as diferenças de tempo de chegada do sinal a cada microfone são estimadas usando a correlação cruzada com a função de peso PHAT [7]. Conhecendo as diferenças de tempo esperadas, um campo escalar custo referente ao problema é definido e o vetor que o minimiza é dado como DoA.

Para tanto, a precisão do método de determinação da DoA no caso mais brando teve de ser testada. Foram então realizados experimentos que comprovaram a polidez do algoritmo e seu pleno funcionamento: Tanto um experimento de campo quanto simulações com software foram usadas para corroborar o método.

Para o caso espacial um método de aprimoração da estimação da DoA foi criado objetivando encontrar o mínimo da função custo restrito a vetores de norma unitária, a partir da modelagem e resolução de um sistema não-linear. A este, foi dado o nome de NLC (*Non-Linear Constrained estimation*, ou estimativa com restrição não-linear) [11] em contraste ao mais comumente usado, a Estimativa Padrão (*Standard Estimation*, ou SE). Tal método não é diretamente aplicável ao caso plano, mas seus resultados podem ser utilizados em casos específicos para melhorar a estimativa.

É utilizado também um método de seleção de dados chamado Busca Exaustiva (*Exhaustive Search*, ou ES) objetivando a eliminação de diferenças de tempo que estariam possivelmente prejudicando a determinação da DoA, recebendo um número n do operador a representar o tamanho da n -upla de pares a permanecer na estimativa. Apesar do método

ter sido introduzido anteriormente [5], um algoritmo de aplicação generalizada foi criado e é introduzido e aplicado aos resultados.

Antes de realizar o experimento com o drone, foram aplicadas as técnicas de determinação da DoA para a localização de fontes de sinais sonoros com a triangularização desta através de 3 arranjos estacionários [13][11]. Em um trabalho conjunto com a EMGEPRON, técnicas de Mínimos Quadrados (*Least Squares*, ou LS) e a técnica de Mínimos Quadrados Totais (*Total Least Squares* ou TLS) [10] foram estudadas para estimar a posição da fonte em função das retas dadas pelas DoAs, estimadas pelo método utilizando 2 arranjos espaciais (4 microfones e 7 microfones) e 1 linear (8 microfones) de forma a encontrar a região de maior probabilidade da fonte.

Foram feitas simulações em software para testar os desempenhos dos arranjos [13], do LS e do TLS. Também foram tratados e gravados sinais de um projétil auto-explosivo na região da Marambaia (RJ) [13] e de um canhão [11] sinalizado por uma carga explosiva na fábrica da Empresa de Gerenciamento de Projetos Navais (EMGEPRON) [2], firma vinculada à Marinha que objetiva o gerenciamento dos projetos aprovados por esta e assim promover a Indústria Naval Brasileira.

Ao fim, munido de conhecimentos sobre os casos espacial e linear, os conhecimentos desenvolvidos são adaptados ao caso plano e aplicados à captação do sinal com o drone e uma estimativa da DoA é feita. São também feitas as simulações para comprovar a precisão do método no caso planar e decidir pelo melhor número de pares a ser considerado de forma a eliminar estimativas de tempo comprometidas na maioria dos casos enquanto minimizando a perda de informação. Os sinais processados para o experimento de campo foram gravados de um drone sobrevoando a pista de atletismo da Escola de Educação Física do Exército (EsEFEx).

Para remediar problemas resultantes de imprecisões de posicionamento e orientação dos arranjos, foram feitos marcos topográficos nos locais pertinentes por uma equipe de cartógrafos da Seção de Cartografia do IME, a SE/6, com o objetivo de se ter as medidas mais precisas possíveis. Com os marcos, é utilizado um método de calibração desenvolvido para remediar problemas de orientação e se certificar que pequenos desvios não vão causar problemas para a estimativa.

Processados os dados e feitas as simulações, os resultados são discutidos. O NLC é comparado ao SE tanto para o caso espacial, nos experimentos de localização de fonte sonora, quanto no caso da estimativa de DoA a partir do drone, ou seja, a adaptação bidimensional dos métodos de DoA previamente explorados.

2 Descrição dos experimentos

Este trabalho tem como seu foco a determinação da DoA de uma fonte de sinais sonoros gravados de um arranjo de microfones embarcado em um drone, mas não foi o único tópico abordado ao longo do ano. Também foi estudada em conjunto com a EMGEPRON a localização de fontes sonoras utilizando o cálculo das DoAs. Estes conhecimentos foram consequentemente aplicados na consolidação do método, seja simulando resultados [13] ou realizando uma aplicação prática em campo e o desenvolvimento de um método de calibração para remediar problemas de precisão de orientação e posicionamento [11]. Os aspectos mais específicos a cada experimentos são discutidos nesta seção.

2.1 O experimento com o drone

O drone utilizado para realizar os experimentos foi o Phantom 4 da DJI Electronics. Este drone pesa 1,38 kg, tem 35cm de tamanho na diagonal, possui controle de estabilidade, GPS e câmera 4K [1]. Para o experimento, foi acoplado nele um arranjo de microfones com hastes de acrílico de 41cm de comprimento seguindo as diagonais, como pode ser visto na Figura 1.



Figura 1 – Foto do drone Phantom 4 com as hastes de acrílico inclusas, tirada por Jorge Paulo do Bomfim.

As hastes foram colocadas como medida para distanciar os microfones das hélices e

diminuir a influência destas no sinal capturado. Os microfones foram colocados aproximadamente na mesma altura e ligados a um gravador gravador digital de 4 canais da TASCAM, escolhido pelo seu peso relativamente reduzido quando comparado aos outros gravadores disponíveis no laboratório. Os microfones foram predispostos em uma geometria plana, não espacial (a geometria mais ideal para a estimativa de DoA), porque o drone precisava de espaço para pousar sem danificar as hastes.

Se tivessem sido colocadas alturas diferentes, mas com pequenas diferenças, o resultado seria dado por sistemas muito mal condicionados e com resultados pouco confiáveis, como será visto na Seção 6.2. Desta forma, os métodos já conhecidos de estimativa da DoA foram adaptados para o caso plano. As particularidades do caso plano foram estudadas a fundo e percebeu-se ótima precisão na estimativa do azimuth, mas com precisão ruim do zênite.

Outro problema foi o ruído, que é sempre presente em experimentos práticos, mas no caso de um tiro gravado a partir de um drone, se torna um transtorno ainda maior devido ao barulho das hélices. Portanto, foram aplicadas técnicas de tratamento do sinal, almejando redução de ruído e eliminação de multipercurso, discutidas no Capítulo 3.

Devido a circunstâncias internas ao laboratório e dificuldades de medir com o drone, só foi feito 1 experimento com este, o qual apresentou resultados satisfatórios. Os outros experimentos são citados e descritos neste trabalho como uma forma de explicar e expor a precisão do método e as vantagens e desvantagens da mudança de geometria para a plana.

Os sinais sonoros processados são capturados pelos 4 microfones predispostos nos vértices de um quadrado. Logicamente, quanto maior o número de microfones, mais precisa tende a ser sua estimativa para um mesmo tipo de geometria, mas cuidados devem ser tomados sobre as condições do problema e sobre o condicionamento do sistema.

As geometrias linear e plana possuem limitações quando comparadas à geometria espacial que tornam suas estimativas menos precisas: o arranjo plano determina elevação através da norma da estimativa bidimensional, o que significa que erros na estimativa da norma do vetor resultam diretamente em erros na elevação. Devido ao caráter de contração de funções senoidais, erros pequenos de norma causam grandes erros de elevação que prejudicam a precisão da estimativa. Já os arranjos lineares são inteiramente incapazes de determinar elevação, precisando que essa informação ou seja fornecida externamente ao processamento ou que a fonte sonora se encontre aproximadamente na mesma altura do arranjo para determinar seu azimuth precisamente.

Desta forma, o arranjo espacial seria preferível na maioria dos casos. Infelizmente, por limitações inerentes ao uso do drone, a geometria plana acabou sendo mais apropriada que tentar montar um arranjo espacial, como é explicado da Seção 5.3. O arranjo de microfones utilizado no drone está descrito na Tabela 1, com a numeração e as coordenadas de cada microfone.

Tabela 1 – Arranjo dos microfones no drone (4 mics)

Microfone	x (cm)	y (cm)
1	28,9914	-28,9914
2	-28,9914	-28,9914
3	-28,9914	28,9914
4	28,9914	28,9914

2.2 O experimento com a EMGEPRON

Para os experimentos em conjunto com a Marinha Brasileira, foram utilizados 3 tipos de arranjos: 1 arranjo espacial com 7 microfones ligado ao gravador digital Zoom F8 (Po-1), um arranjo linear com 8 microfones ligado à Interface de Audio Presonus Audiobox 1818VSL USB(Po-2), e um arranjo espacial com 4 microfones ligado ao gravador digital TASCAM (Po-3). Realizados os experimentos, percebeu-se que a geometria, o número de microfones e o gravador usado influenciaram o desempenho de cada arranjo.

Foram realizados 2 experimentos de tiro em campo [11] e várias simulações com os arranjos [13] para comparar e contrastar o desempenho, os méritos e os deméritos de cada um. Foram impostas limitações aos parâmetros de simulação com o objetivo de comparar os 3 arranjos nas condições mais parecidas possíveis, como será explicado na Seção 8.1.1.

O arranjo linear só tem a capacidade de determinar o primeiro afixo do vetor direção de chegada. Ou seja, a projeção da DoA ao longo de seu eixo. Desta forma, além de apresentar ambiguidades devido a vetores diferentes serem capazes de ter a mesma projeção em um eixo, o arranjo linear também é completamente incapaz de diferenciar elevação. Isto torna o arranjo linear muito limitado em relação às condições necessárias para que ele tenha uma resolução razoável dos resultados.

Ambos arranjos espaciais tem boa resolução de azimuth e de zênite independente das condições usadas. O arranjo de 7 microfones tende a dar melhores estimativas por lidar com mais informação que o arranjo de 4, mas este lida com matrizes em geral mais bem condicionadas, tendo portanto um erro numérico mais bem contido, conceito expandido na Seção 6.2. Ambos arranjos espaciais também são capazes de utilizar o NLC para melhorar suas estimativas, estabelecendo a geometria espacial como a ideal para este tipo de experimento.

Outro fator que diferenciou o desempenho dos arranjos foi o gravador utilizado: os gravadores digitais tiveram desempenho superior quando comparados a um gravador conectado a uma porta USB. Foi então criado o conceito de coerência: utilizando o método de seleção de data ES, explicado na Seção 6, enquanto as respostas para ambos gravadores digitais se mantinham relativamente consistentes entre si, as respostas do gravador USB variavam muito.

Foram realizados 2 experimentos práticos com os arranjos estacionários. Um deles foi

no Centro de Avaliação do Exército (CAEx, na Restinga da Marambaia), que consistia na localização da detonação de um projétil Alto Explosivo [13] e tem resultados menos confiáveis comparado ao segundo experimento, realizado na EMGEPRON. Isto foi devido a problemas com a precisão do posicionamento exato dos arranjos e suas orientações. Porém, o experimento ainda foi proveitoso por ter dado a oportunidade de testar o NLC e comprovar sua capacidade de minimizar o custo relativo à resposta irrestrita.

O experimento realizado na EMGEPRON foi o primeiro experimento em campo em que foi aplicado o esquema de calibração explicado na Seção 2.3. Com as coordenadas das posições de cada arranjo agora determinadas pelos profissionais da SE/6, o esquema de calibração foi executado e a equipe mediu os desvios utilizando o equipamento cartográfico com o fim de comparar os resultados pós-processamento. Daí, foram detonadas cargas de um canhão com a posição conhecida e os sinais foram gravados pelos arranjos. Com o posicionamento mais preciso e formas de determinar a orientação do arranjo, os sinais foram processados.

Os arranjos estacionários não sofreram o mesmo nível de ruído dos sinais gravados do drone, mas ainda assim foram submetidos aos mesmos passos de tratamento de sinal descritos no Capítulo 3. A geometria da fábrica onde as gravações foram feitas deixou os sinais capturados suscetíveis a efeitos de multipercurso, justificando o uso das técnicas que mitigassem este. Por outro lado, o ruído tem uma presença bem mais forte e constante no tiro gravado do drone.

Como o arranjo linear é incapaz de estimar elevação, esta foi estimada externamente utilizando as cotas do gravador e das fontes do sinal de forma a compensar o efeito destas e melhorar a precisão de suas medidas.

2.3 Esquema de calibração

Um dos maiores problemas que surgiram na determinação da DoA foi a precisão das posições recebidas pré-processamento e a orientação exata dos arranjos. Inicialmente as posições utilizadas para os experimentos foram retiradas usando o programa Google Earth, um programa que não foi criado para aplicações com a precisão requerida.

Outro problema foi a orientação dos arranjos. Determinar a orientação dos arranjos usando uma bússola se mostrou uma maneira muito imprecisa para a presente aplicação. Assim, um esquema de calibração teve de ser criado. Foi considerado que se o arranjo permanecesse parado, qualquer desvio aplicado seria constante para todas as medidas. Em outras palavras, os eixos verdadeiros e os eixos do drone seriam uma rotação um do outro com um ângulo de desvio de $\Delta\phi$. Desta forma, o esquema de calibração teria como objetivo determinar este desvio na forma de uma constante de correção que seria somada aos valores determinados de forma a ter o ângulo correto.

Em outras palavras, como o eixo correto e o eixo do Drone tem desvios contantes um

do outro, para se obter o ângulo de varredura correto ϕ , basta somar o ângulo estimado usando os eixos do drone e somar a correção estimada $\Delta\phi$ como ilustrado na Figura 2.

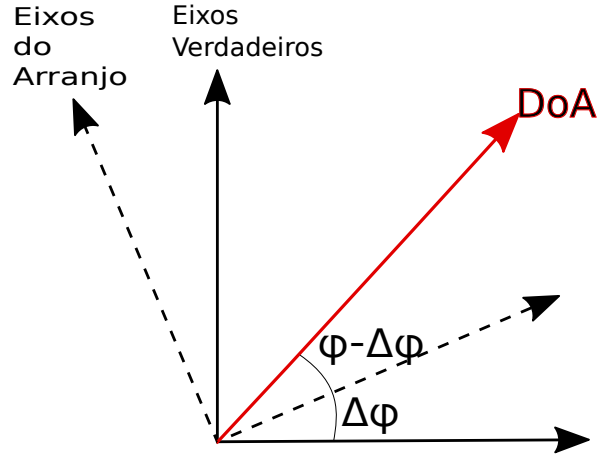


Figura 2 – Figura ilustrativa da relação entre os eixos e os ângulos de varredura correspondentes.

Para o teste do método de calibração, um experimento foi montado no jardim interno do IME. Foram montados os 3 arranjos utilizados para localização de fonte em 3 posições distintas, com suas posições estimadas utilizando trenas, conforme ilustrado na Figura 3. A precisão destas medidas não atende aos padrões de precisão dos profissionais da SE/6, mas para um teste, foi suficiente. Foram então feitos 3 tiros acima de cada arranjo utilizando uma arma de ar comprimido, que foram utilizados como tiros de calibração.

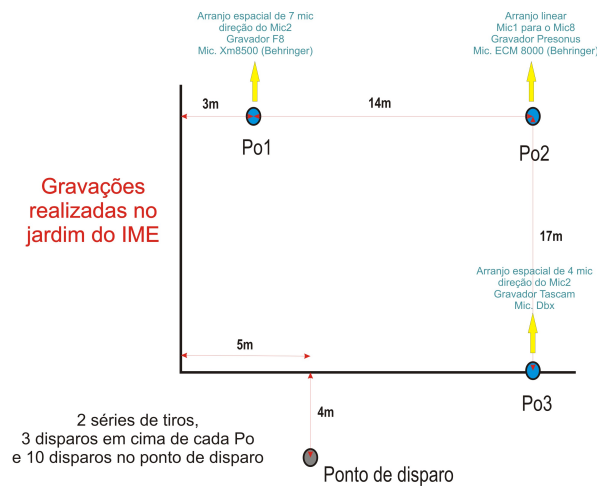


Figura 3 – Desenho da configuração do experimento do esquema de calibração, feito por Jorge Paulo do Bomfim.

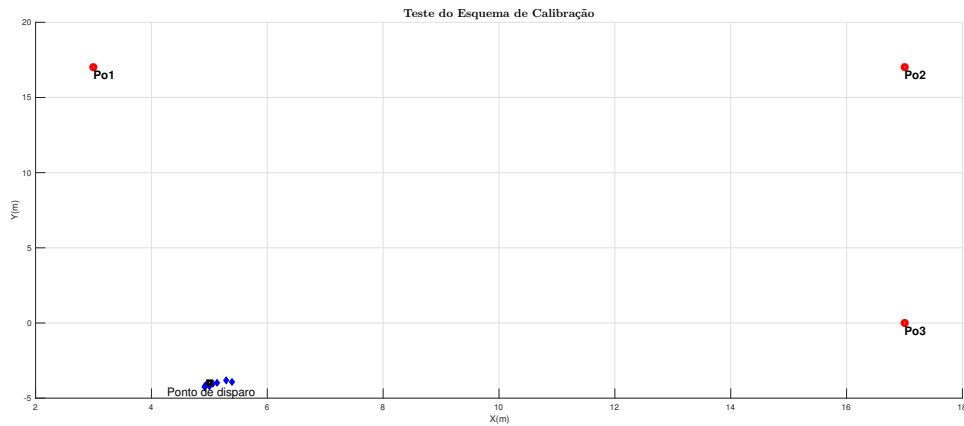


Figura 4 – Estimativa do ponto de disparo, em que cada ponto azul corresponde a uma estimativa.

Feitos os 9 tiros de calibração, foram realizados 10 tiros na posição denominada "ponto de disparo". Daí, os tiros foram processados, a correção foi aplicada às medidas e o resultado entregue como as DoAs. Com as DoAs de cada arranjo, foi estimada a fonte dos disparos utilizando o método dos Mínimos Quadrados (*Least Squares method*, ou LS), que será discutido na Seção 7.1.

Por causa de um ar-condicionado que foi ligado nas proximidades do local das gravações, o ambiente do teste era relativamente ruidoso. Também se tratava de um ambiente cercado de paredes que causaram problemas de multipercurso. Apesar disto, após o tratamento dos sinais de disparo com as técnicas que serão introduzidas no Capítulo 3 e de seu processamento, o método foi capaz de determinar a fonte dos sinais sonoro com boa precisão, como mostrado na Figura 4 comprovando o seu funcionamento. Desta forma, este método foi repetido nos experimentos em campo realizados posteriormente.

Para resolver o problema das posições nos experimentos em campo, fomos acompanhados por profissionais da Seção de Cartografia do IME, a SE/6, que determinaram as posições dos marcos relevantes com a mais alta precisão. Daí, um ou mais tiros de calibração são feitos. Do processamento da DoA destes tiros são calculados os desvios subtraindo da DoA retirada das posições dos marcos os valores estimados.

Para o experimento com o drone, havia apenas um marco de onde vinham tanto os tiros de calibração quando os tiros de localização. Foram, porém, computados os resultados com 3 alturas distintas: 25, 50 e 100 metros, cada um com sua constante de calibração devido a possíveis desvios observados pelo drone enquanto este mudava de altura. Por esta razão, o método de calibração não é apropriado para o drone em uma implementação prática em tempo real. A dependência de um sinal de tiro para ajuste junto da possibilidade de mudança de orientação do drone a qualquer momento torna o método irreconciliável. Porém, para os fins do experimento em situações controladas e

com o processamento offline objetivando apenas apurar a precisão da estimativa da DoA, o esquema se mostrou suficiente.

Para o caso da localização de fonte sonora, foram feitos 3 tiros em cima de cada um dos 3 arranjos, dando para cada arranjo 2 marcos nas posições dos arranjos remanescentes. Desta forma, são coletadas 6 constantes de calibração para cada arranjo. A constante de calibração consolidada é retirada fazendo a média da combinação de 3 valores com o menor desvio padrão. Para este caso com arranjos estacionários, o método de calibração se mostrou mais apropriado e menos passível a erros, tendo resultados de precisão comparáveis a aqueles obtidos através do uso de equipamento topográfico.

3 O tratamento do sinal

Nesta Seção são abordados os métodos aplicados para realizar o tratamento dos sinais capturados no campo de forma a destacar os picos e torná-los mais próximos do ideal impulsivo desejado. A presença de ruído em uma gravação é inescapável, mas existem técnicas capazes de reduzir grandemente a sua influência.

Outro fator sempre presente nas medidas que gera problemas é o problema de multi-percurso, ou seja, reflexões sonoras capturadas com uma defasagem pequena entre si. A fim de processar apenas a porção de interesse do sinal e retirar a influência das reflexões, foi utilizada a técnica chamada Recorte do Sinal (*Signal Clipping* ou SC) nas gravações realizadas. Os tiros gravados do drone na EsEFEx apresentaram reflexões graças à estrutura do local onde foram feitas as gravações: a pista de atletismo da EsEFEx onde foram gravados os tiros do drone está próxima de várias construções que podem refletir os sinais e aparecer na gravação.

Já o ruído teve de ser tratado por se tratar de um problema inerente aos sons gravados e aos equipamentos utilizados. Óbvio, o ruído afetou muito mais as gravações do drone em relação a uma gravação normal a nível do chão, uma vez que os microfones se encontravam próximos de uma fonte constante de ruído: as hélices. Mesmo assim todos os sinais foram submetidos ao mesmo tratamento: após a realização do SC, foi aplicada a técnica da Filtragem Mediana (*Median Filtering* ou MF) nos sinais e foi percebida uma grande diminuição da presença do ruído.

Nas seções seguintes, serão exploradas ambas as técnicas em sua ordem de aplicação quando usadas nos sinais altamente ruidosos do drone Phantom 4. A aplicação dos métodos foi um sucesso, como pode ser visto na Figura 5. O sinal de tiro foi propriamente destacado mesmo se tratando de um tiro a 100 metros de altura, com uma SNR inicial muito baixa.

3.1 Recorte do Sinal

O Recorte do Sinal objetiva eliminar picos falsos dos sinais que aparecem nas gravações recortando-os através da multiplicação do sinal pelos valores de uma função janela que engloba o intervalo desejado. Por se tratar de uma função janela, o restante do sinal exterior à porção de interesse é descartado e valores capturados na vizinhança da porção de interesse serados. Desta forma, apesar de não ser este seu objetivo principal, o SC também ajuda a melhorar a SNR do sinal por eliminar porções especialmente ruidosas.

A Janela escolhida é uma função de Hann cuja largura é feita grande o suficiente para englobar todo o sinal de tiro e pequena o suficiente para descartar a porção refletida.

Foi escolhida a função janela de Hann [3] por se tratar de uma função contínua, dando maior suavidade ao sinal resultante da multiplicação. O processo de montagem da janela não foi automatizado por não se tratar do foco principal do trabalho: as janelas foram montadas descobrindo o primeiro pico de sinal, o pico de reflexão correspondente do sinal refletido e abscissa correspondente ao zero mais próximo deste. Daí, era montada uma janela que destaca o primeiro pico do sinal desejado enquanto sua evanescência ocorre suficientemente rápido de forma a ignorar o primeiro pico refletido.

Apesar de ter um efeito atenuador no ruído, o SC é incapaz de influenciar o ruído que ocorre concomitantemente ao sinal, uma vez que a janela isola este junto do sinal. Assim, problemas como a formação de vales distorcem a forma do sinal e retiram o caráter impulsivo desejado. Portanto, foi necessário utilizar uma técnica de filtragem apropriada para aumentar a SNR.

3.2 Filtragem Mediana

O sinal recebido, vindo do drone ou não, irá sofrer com a contaminação do ruído proveniente de variáveis inerentes aos sistemas considerados. Portanto, em uma tentativa de melhorar os resultados e obter amostras de sinal mais próximas do ideal impulsivo, foi aplicado o método de filtragem Filtragem Mediana, originalmente introduzido em [6].

O método consiste em passar uma janela através do sinal e retirar a mediana dos valores do intervalo de cada amostra enquanto caminha com a janela por todo o intervalo, com a expectativa de diminuir a presença do ruído no sinal como um todo. Como pode ser visto na Figura 5, o uso do MF diminui o nível do ruído mesmo sem o SC, se desfazendo de oscilações indevidas.

Apesar da relativa simplicidade, tanto computacional quanto conceitual, o MF se mostrou extremamente efetivo em dar aos sinais o caráter desejado, eliminando vales problemáticos. O tiro na Figura 5 exemplifica bem este caso: o tiro foi captado a 100 metros de altura e teve de ser normalizado para sequer ser visto no processo de edição, mas após o tratamento, o sinal tem um caráter impulsivo muito forte.

A razão da ordem dos métodos se refere ao fato do SC reduzir a quantidade do ruído ao redor do sinal e também reduzir a quantidade de dados com necessidade de ser processados. Caso a MF seja aplicada antes, o filtro acaba tratando extensas porções do sinal que serão descartadas ao usar o SC enquanto realizar o MF antes não parece trazer qualquer vantagem, como visto na Figura 5.

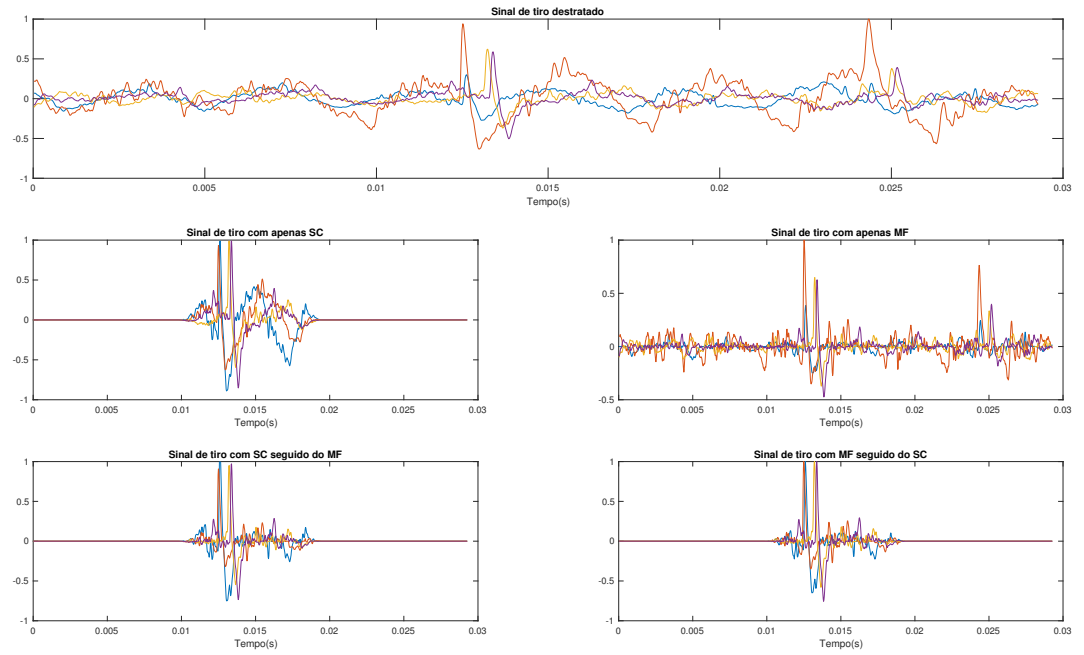


Figura 5 – Aplicação dos métodos de SC e MF em um sinal de tiro gravado a 100 metros do nível do chão.

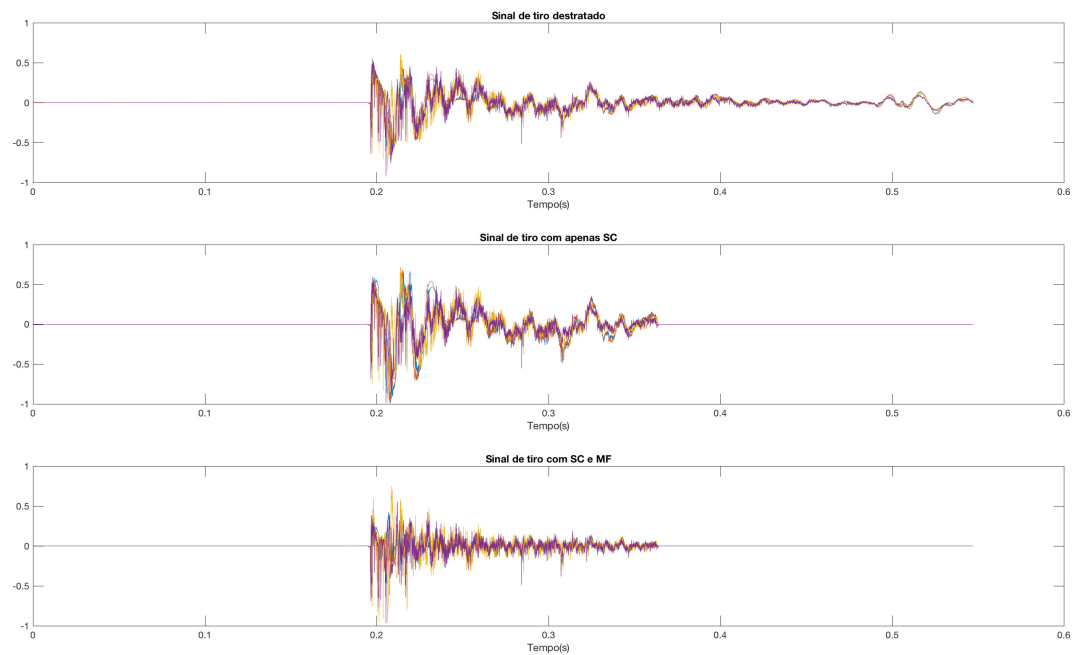


Figura 6 – Aplicação dos métodos de SC e MF em um sinal de tiro gravado pelo arranjo de 4 microfones estacionário no chão.

4 A determinação das diferenças de tempo entre microfones

Para 2 microfones distintos, é esperado que o sinal capturado seja o mesmo em ambos os casos, exceto com um atraso devido ao posicionamento do microfone. A esta grandeza, é associada a variável τ como sendo o vetor contendo todos os valores de atraso de cada par de microfones. Como os sinais analisados são impulsivos, espera-se sinais altamente decorrelatados. Ou seja, espera-se uma correlação cruzada generalizada de caráter impulsivo também, sendo que a abscissa relativa ao auge deste se localiza na coordenada equivalente ao tempo de atraso.

Para a família de sinais $\{x_k\}_{k \in \{1,2,\dots,N\}}$, considerando um total de N sinais, convencionase que a família de FFTs correspondentes será $\{X_k\}_{k \in \{1,2,\dots,N\}}$, e portanto suas correlações cruzadas generalizadas $\{gcc_{i,j}\}_{(i,j) \in \{1,2,3,\dots,N\}^2 e i < j}$ terão FFTs $\{GCC_{i,j}\}_{(i,j) \in \{1,2,3,\dots,N\}^2 e i < j}$, definida para os microfones i e j como:

$$GCC_{i,j} = X_i \cdot X_j^*, (i,j) \in \{1, 2, 3, \dots, N\}^2 e i < j. \quad (4.1)$$

Porém, como visto em [7], para sinais banda larga a função the peso PHAT pode ser aplicada para tornar a correlação cruzada generalizada mais próxima do ideal impulsivo. Chamando as *gcc – phats* de $\{r_{i,j}\}_{(i,j) \in \{1,2,3,\dots,N\}^2 e i < j}$ as suas FFTs correspondentes $\{R_{i,j}\}_{(i,j) \in \{1,2,3,\dots,N\}^2 e i < j}$ serão definidas como:

$$R_{i,j} = \frac{X_i \cdot X_j^*}{|X_i| \cdot |X_j^*|}, (i,j) \in \{1, 2, 3, \dots, N\}^2 e i < j. \quad (4.2)$$

Daí, as *gccs* e *gcc – phats* podem ser obtidas simplesmente aplicando a IFFT nestas. Como pode-se ver na Figura 7, a *gcc – phat* realmente mostra um caráter impulsivo mais forte que a *gcc* clássica. Ou seja, será esta a utilizada para estimar os atrasos. Para encontrar cada atraso $\{\tau_{i,j}\}_{(i,j) \in \{1,2,3,\dots,N\}^2 e i < j}$, basta encontrar a abscissa correspondente ao pico da função de correlação, dado por:

$$\tau_{i,j} = r_{i,j}^{-1} \left(\max_{-\tau_{MAX} \leq \tau \leq \tau_{MAX}} (r_{i,j}(\tau)) \right) / f_s. \quad (4.3)$$

Em que $r_{i,j}^{-1}$ é a função inversa de $r_{i,j}$ e τ_{MAX} representa o atraso máximo possível entre 2 microfones: quando a frente de onda passa pela pelo segmento de reta que os une. Como os sinais encontrados são amostrados, e portanto são discretos, é possível

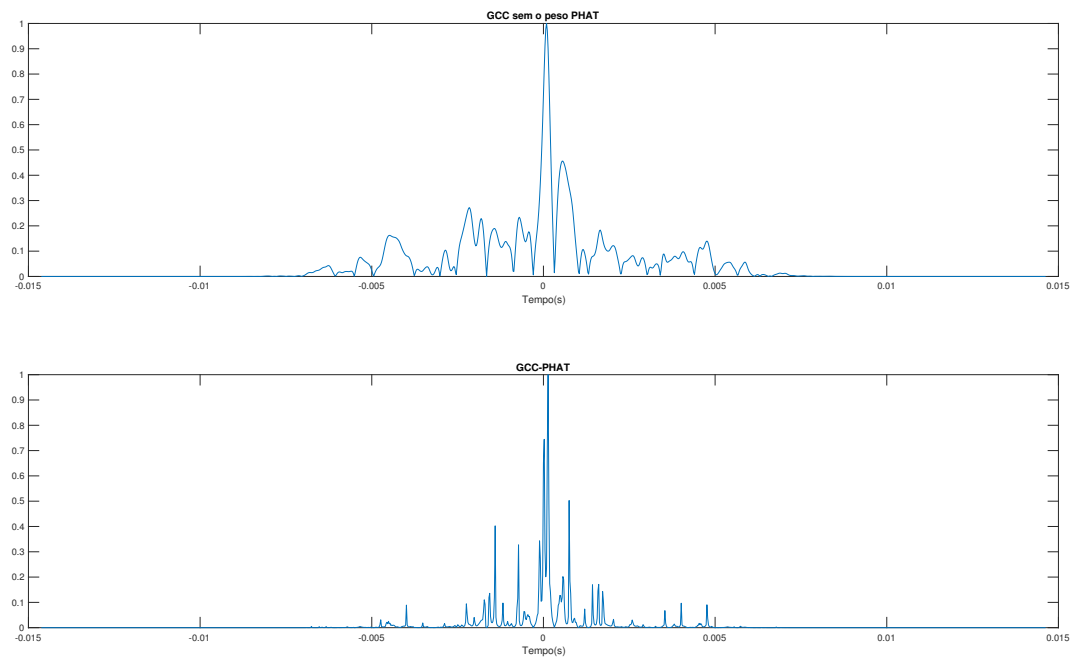


Figura 7 – Comparação dos métodos de GCC e GCC-PHAT em um sinal de tiro gravado a 100 metros do nível do chão.

melhorar a precisão da estimação dos atrasos fazendo uma interpolação em torno do pico e analisando este máximo encontrado no intervalo [8]. Nos experimentos práticos, tanto os experimentos de campo quanto as simulações utilizaram valores com a interpolação em 10 pontos em torno do pico.

5 A estimativa da DoA

Denominando o vetor unitário da direção de chegada $\mathbf{a}_{DoA}$, o ângulo de varredura ou azimute sendo $\phi \in [0, 2\pi]$ e o ângulo de elevação ou zênite sendo $\theta \in [0, \pi]$, tem-se que:

$$\mathbf{a}_{DoA} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \cos(\phi) \\ -\sin(\theta) \sin(\phi) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix}. \quad (5.1)$$

Observando a Figura 5 e dados microfones i e j , o tempo de atraso da chegada $t_{i,j}$ do sinal de um para o outro pode ser determinado como visto abaixo:

$$t_{i,j} = \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^T \mathbf{a}_{DoA}}{v_s} = \frac{\Delta \mathbf{p}_{i,j}^T \mathbf{a}_{DoA}}{v_s} = \Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}^T \mathbf{a}_{DoA},$$

$\mathbf{p}_i$ e $\mathbf{p}_j$ são as posições dos microfones i e j , $\Delta \mathbf{p}_{i,j}$ é o vetor diferença das posições, v_s é o valor da velocidade do som e $\Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}$ é o vetor diferença das posições dividido pela velocidade do som. Considerando que $\tau_{i,j} \approx t_{i,j}$, é definido um campo escalar que será denominado função custo $\xi(\mathbf{a})$ como sendo:

$$\xi(\mathbf{a}) = \sum_{(i,j) \in \{1,2,3,\dots,N\}^2 \text{ e } i < j} (\tau_{i,j} - \Delta \mathbf{p}_{i,j}^T \mathbf{a}_{DoA})^2. \quad (5.2)$$

A partir daí, é determinado $\mathbf{a}_{DoA}$ como sendo o valor que minimiza a função custo. Foram determinadas 2 formas de fazer isto, que serão discutidas a seguir.

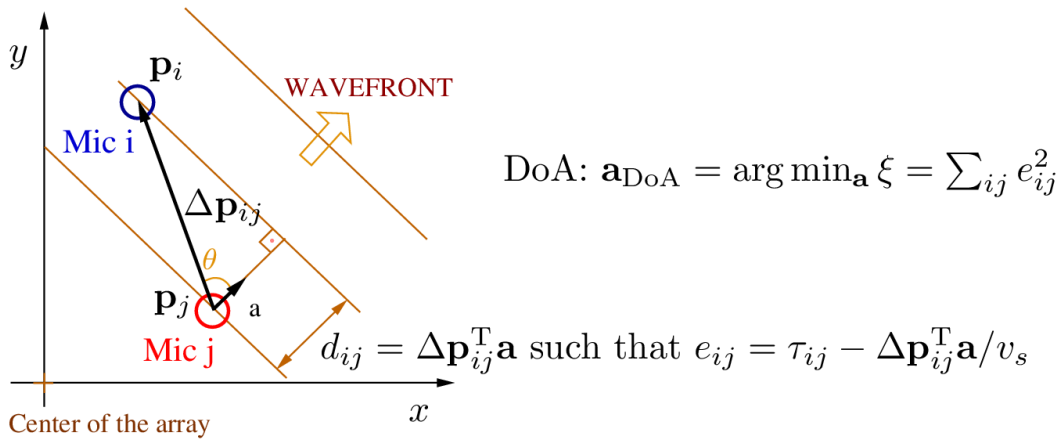


Figura 8 – Imagem ilustrativa da DoA (figura utilizada com permissão do autor, J. A. Apolinário Jr.).

5.1 Estimativa Padrão

A primeira e mais simples é a chamada Estimativa Padrão (SE), que consiste em encontrar a abscissa que minimiza a função custo no espaço irrestrito. Desta forma, como a função é totalmente derivável independentemente dos atrasos encontrados ou das posições dos arranjos, seu mínimo global se existir pode ser determinado encontrando o vetor $\mathbf{a}$ que é ponto de mínimo de ξ . Ou seja, deseja-se o vetor $\mathbf{a}$ que zera o gradiente e é ponto de mínimo. Realizando o gradiente de ξ , tem-se que:

$$\nabla \xi(\mathbf{a}) = 2\mathbf{R}\mathbf{a} - 2\mathbf{p}. \quad (5.3)$$

Em que $\mathbf{R} = \Delta \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{p}$, $\Delta \mathbf{p}$ é a matriz composta pelos possíveis $\Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}$, $\boldsymbol{\tau}$ é um vetor coluna com os valores dos atrasos $\tau_{i,j}$ e $\mathbf{p} = \Delta \mathbf{p}^T \boldsymbol{\tau}$. E a matriz Hessiana de ξ será:

$$\mathbf{H}(\xi) = \mathbf{R}.$$

É simples de demonstrar que $\mathbf{R}$ é necessariamente uma matriz de Kernel positivo-definido. Portanto, a função custo terá apenas pontos de mínimo como pontos críticos. Ou seja, para determinar o mínimo global, basta encontrar o vetor $\mathbf{a}$ que anula o gradiente. Caso $\mathbf{R}$ seja não-singular (fator que depende da montagem dos arranjos), o sistema terá apenas uma solução, que será logicamente o mínimo global. Portanto, o vetor $\mathbf{a}_{DoA}$ será determinado como:

$$\mathbf{a}_{DoA} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}. \quad (5.4)$$

Porém, nada na resolução do problema de encontrar a DoA garante a norma unitária do vetor $\mathbf{a}_{DoA}$ no caso espacial (ou mesmo uma norma menor que 1 nos demais casos). A solução de problemas de máximos e mínimos no espaço irrestrito é apenas um caso particular do problema equivalente para o espaço com restrição. A análise do caso de máximo com restrição e suas vantagens e desvantagens em relação ao SE são estudados na próxima Seção.

5.2 Restrição não-linear

A estimativa feita a partir do SE dificilmente tem norma unitária após a resolução do caso irrestrito. Uma tolerância foi imposta na norma de forma a não admitir $\mathbf{a}_{DoAs}$ de norma muito distante da norma unitária. A estimativa é então normalizada de forma a se obter um vetor unitário para o caso espacial. Porém, não há embasamento teórico forte que justifica esta estimativa normalizada como sendo o vetor unitário que minimiza o custo.

Enquanto a estimativa original representa o mínimo global do custo, sua normalização não necessariamente representa o vetor unitário de menor custo. A determinação do vetor unitário de menor custo pode ser computada analisando a minimização da função custo restrita à bola de raio unitário e centro na origem. O problema, portanto, pode ser visto como um problema de máximos e mínimos com restrição.

Enquanto um problema de encontrar máximos e mínimos locais no espaço irrestrito envolve apenas encontrar o vetor que zera o gradiente e analisar se o ponto é de máximo, mínimo ou sela, o caso com restrição é levemente diferente. Dada uma função $f(\mathbf{a})$ com uma restrição da forma $g(\mathbf{a}) = K$, com K constante, $\mathbf{a}$ será um ponto crítico se o gradiente de f em $\mathbf{a}$ for paralelo ao gradiente de g em $\mathbf{a}$. Ou seja, o problema se resume a resolver o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \nabla f - \lambda \nabla g \\ g - K \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{N+1,1}$$

Em que λ é um valor chamado "interpolador de Lagrange" e $\mathbf{0}_{N+1,1}$ é o vetor nulo $(N+1)$ -dimensional. Assim, o problema se tornou um sistema não-linear de $N+1$ equações e $N+1$ variáveis. Para o caso específico do problema de determinação da DoA, f será a função custo ξ , g será a norma do vetor ao quadrado e K será 1, representando a restrição de norma unitária. Como o gradiente do custo já é conhecido da equação 5.3 e o gradiente da norma ao quadrado é $\nabla g = 2\mathbf{a}$, chamando $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \lambda \end{bmatrix}$ a nossa variável, o sistema toma a forma:

$$F(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 2(\mathbf{R} - \lambda I)\mathbf{a} - 2\mathbf{p} \\ \|\mathbf{a}\|^2 - 1 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{N+1,1}. \quad (5.5)$$

Este sistema pode ser desenvolvido algebricamente de forma a se obter um polinomial de grau $2N$ em λ que pode ser solucionado para se obter o interpolador de Lagrange, mas a necessidade de análise cuidadosa sobre o interpolador e o fato do método ter sido desenvolvido inicialmente para o caso espacial tornou mais conveniente a resolução do problema através de um método puramente numérico: o método de Newton para resolução de sistemas não-lineares.

Para a utilização do método de Newton, deve-se calcular a Jacobiana de nosso sistema e escolher um valor inicial para a sequência que entregará a solução. Foi escolhido como tal valor inicial o resultado encontrado na equação 5.4 e $\lambda = 0$, ou seja $\mathbf{v}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p} \\ 0 \end{bmatrix}$. Se a Jacobiana de F for chamada de $\mathbf{J}$, a seguinte lei de formação é criada:

$$\mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{v}_k - \mathbf{J}^{-1}F(\mathbf{v}_k)$$

Em que a Jacobiana $\mathbf{J}$ de F é de fácil determinação e de fácil representação:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{R} - 2\lambda\mathbf{I} & 2\mathbf{a} \\ 2\mathbf{a}^T & 0 \end{bmatrix}$$

Assim, os termos da sequência são determinados por diversas iterações e o processo se repete enquanto a norma da função F for maior que uma tolerância a ser definida pelo usuário. A este método, foi dado o nome de *Non-Linear Constrained Estimation*(NLC), que realmente reduziu drasticamente o custo e resultou em medidas mais precisas em comparação ao SE, mas restrito apenas para o caso espacial. O NLC foi aplicado em um conjunto de tiros realizados na Marambaia no dia 09 de Agosto de 2017 [11] e os resultados na redução de custo podem ser vistos na Figura 9, para um arranjo espacial de 7 microfones. Também foram feitas uma série de simulações em Software que comprovaram que o NLC diminui o erro verdadeiro de estimação também, na Tabela 2, mostrando convergência rápida (poucas iterações) para uma tolerância de 10^{-9} .

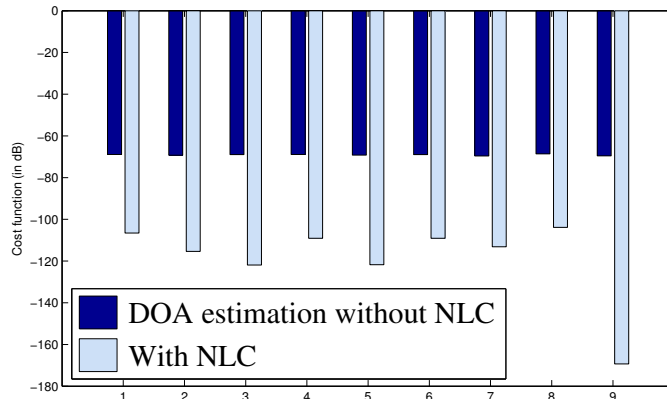


Figura 9 – Comparando custos com e sem NLC (republicada de [11] com a autorização dos autores).

5.3 Métodos adaptados para o drone

Para o drone, como já foi dito na Seção 2.1, os microfones foram predispostos em alturas extremamente semelhantes, tornando a geometria deste experimento plana. A escolha da geometria plana se deu por dificuldades de montagem do arranjo no drone: Por causa das hélices, os microfones tinham de ficar distantes destas usando suportes de acrílico

Tabela 2 – desempenho da estimativa de DoA usando o NLC (republicada de [11] com a autorização dos autores)

σ_τ^2	Erro da SE	Erro da NLC	# iterações
1e-9	0,071	1, 336e-16	4,396
2e-9	0,099	1, 264e-16	4,576
4e-9	0,156	0,003	4,833
6e-9	0,187	0,006	4,986
8e-9	0,233	0,032	5,165
1e-8	0,259	0,035	5,249
2e-8	0,394	0,162	5,565
3e-8	0,492	0,247	5,687

porque o ruído causado inicialmente saturava os microfones e causava dano irreversível às gravações. Por outro lado, suas alturas não podiam variar muito devido à necessidade de deixar espaço para o drone pousar. A relevância destes fatores será explorada na Seção 6.2.

Para o caso plano, a SE pode ser computada da mesma forma usada para os métodos espacial e linear. Diferente do arranjo linear, o arranjo plano é capaz de estimar o ângulo de azimuth com precisão independente do ângulo de elevação e também é capaz de determinar um ângulo de elevação, porém diferente do arranjo espacial, não consegue determinar este diretamente.

Como para o caso plano a matriz $\mathbf{R}$ é bidimensional, é possível determinar apenas 2 dos 3 afixos de $\mathbf{a}_{DoA}$ descritos na equação 5.1, os afixos que dão do ângulo de varredura:

$$\bar{\mathbf{a}}_{DoA} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \cos(\phi) \\ -\sin(\theta) \sin(\phi) \end{bmatrix}$$

Em que $\bar{\mathbf{a}}_{DoA}$ é a projeção de $\mathbf{a}_{DoA}$ no plano horizontal e um vetor de norma $\sin(\theta)$, que será a porção que entregará a elevação. Porém, percebe-se que θ é entregue como um ângulo do intervalo de $[0, \pi]$, intervalo no qual o seno é sempre positivo. Ou seja, existe uma ambiguidade: qualquer medida tomada pode ter vindo por cima ou por baixo do arranjo. Para o experimento realizado, foram gravados tiros de festim na pista de atletismo da EsEFEx ao nível do chão, ou seja, $\theta > 90^\circ$.

Porém, este não é o único problema associado à medição do ângulo de elevação: mesmo a Estimativa Padrão tridimensional não entregava normas estritamente unitárias, o caso bidimensional é análogo, mas com perda da informação do terceiro afixo. Ou seja: o erro de determinação da elevação que já é esperado para a estimativa espacial é composto ao erro de norma observado e faz das estimativas de elevação menos confiáveis que seus

equivalentes espaciais.

Entretanto, o ângulo de varredura depende apenas da relação de sinal e da razão dos 2 afixos entregues, assim tendo uma maior confiança no resultado. De fato, foi observado que enquanto a elevação era dado de baixa confiabilidade e coerência mesmo nos melhores tiros reais ou de simulação do caso bidimensional, o azimuth estimado mantinha tanto boa precisão quanto coerência dos resultados.

Daí, foi ponderado se o NLC poderia ser utilizado para melhorar a precisão de resultados do caso plano. Em outras palavras, saber se a estimativa do melhor vetor unitário bidimensional retorna um azimuth de precisão superior ao caso irrestrito. A priori, dado que a estimativa encontrada via SE está dentro do círculo de raio unitário e centro na origem, não se espera que a estimativa melhore, mas no caso do método encontrar vetor de norma maior ou igual a 1 poderia se esperar uma possível melhora na estimativa do azimuth apenas.

Portanto, para o experimento prático descrito na Seção 8.2, foram calculadas as elevações e alturas através da SE com a norma de $\bar{\mathbf{a}}_{DoA}$ e em seguida foram estimados os azimuths utilizando tanto o SE quanto o NLC. A idéia sendo que o NLC possivelmente melhoraria a estimativa de azimuth, mas a estimativa de zênite permaneceria igual.

6 Busca Exaustiva

Nesta seção, será discutido o método de seleção de dados que foi implementado na determinação da DoA, o Busca Exaustiva (*Exhaustive Search* ou ES). Métodos de seleção de dados são importantes para a determinação da DoA como formas de se ter uma margem de segurança: enquanto a consideração de um maior número de pares aumenta a quantidade de informação disponível, é sempre possível que alguns dos valores encontrados tenham sido comprometidos por fatores relacionados à medida (SNR muito baixa, por exemplo). Desta forma, um método de seleção de dados seria aquele que seleciona, dentre os atrasos possíveis, qual seria a combinação de um número pré-determinado de pares que resulta no melhor custo. A escolha deste número pode ser feita através da escolha prévia de um número de pares ou por uma árvore de decisão, como a implementada em [4].

O ES é um método criado em [5], e consiste na seleção da n -upla de atrasos dentre o total de $M = \frac{N(N-1)}{2}$ que retorna o menor custo. A implementação desse algoritmo, proposta em [5], realiza laços desnecessários e não está adaptada para receber quaisquer valores de M e n . Nesta seção, será proposta um algoritmo capaz de passar por todas as n -uplas sem repetição independente do número total de atrasos M .

Assim, o problema de se definir um método de seleção de dados é o de contrastar a possível perda de informação de se considerar menos pares com a eliminação do maior número de pares possível para se ter a maior margem de segurança enquanto considerando o condicionamento das matrizes $\mathbf{R}$ associadas a cada estimativa. O problema do número de condicionamento em especial pode tirar a confiabilidade dos resultados enquanto sendo completamente imprevisível e, portanto, não pode ser desprezado.

6.1 O Algoritmo

O algoritmo criado para a implementação do ES com generalidade de n e de M consiste na geração de um vetor de coeficientes que determina quais pares de microfones e, portanto, quais atrasos estão sendo considerados presentemente. Para cada n -upla, a $\mathbf{a}_{DoA}$ referente e o valor do custo são calculados e comparados aos valores presentemente armazenados. Caso o custo seja menor que o custo atualmente armazenado, tanto o custo quanto o valor de DoA são trocados. O processo é repetido para todas as n -uplas possíveis.

Para garantir a passagem de todas as combinações, é determinado que os coeficientes no vetor estejam em ordem crescente e são feitos dois laços em loop: o externo é um laço de *while* que garante a repetição do processo enquanto o primeiro coeficiente do vetor tiver

um valor inferior ao valor máximo que este pode tomar, enquanto o laço interno é um laço *for* que garante o percorrimto de todos os valores possíveis do último coeficiente do vetor para aquela iteração.

Como há um total de M coeficientes para escolher entre n possibilidades crescentes, cada posição do vetor de coeficientes terá um valor máximo que pode atingir. Ao final de cada loop interno, é checado se o penúltimo coeficiente atingiu seu valor máximo. Caso não tenha, este é incrementado; caso tenha, o teste é repetido para o seu antecessor e os seguintes tomam valores crescentes em função deste, como descrito no anexo.

6.2 O problema do número de condicionamento

Como a metodologia adotada envolve o uso de matrizes para a determinação da DoA, a resolução dos problemas está sujeita a problemas de condicionamento de matriz. Isto é, o erro relativo encontrado na saída do problema não é necessariamente o mesmo em relação ao erro relativo da entrada.

Para saber o espaço por onde caminha o erro na saída do sistema (isto é, o erro na determinação da DoA) deve-se saber o chamado número de condicionamento da matriz [14]. Para a norma L_2 , o número de condicionamento de uma matriz quadrada $\mathbf{A}$ qualquer é dado como o produto das normas de $\mathbf{A}$ e de sua inversa:

$$\text{cond}(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\|_2 \|\mathbf{A}^{-1}\|_2$$

Assim, considerando erros apenas de aferição dado que a matriz $\mathbf{R}$ depende apenas da posição dos microfones, que é fixa, a relação entre as normas dos erros de entrada e de saída estará contida no seguinte intervalo:

$$\frac{\|\mathbf{e}_{\text{in}}\|_2}{\text{cond}(\mathbf{A})} \leq \|\mathbf{e}_{\text{out}}\|_2 \leq \text{cond}(\mathbf{A}) \|\mathbf{e}_{\text{in}}\|_2$$

Em que $\mathbf{e}_{\text{in}}$ é o vetor erro de entrada e $\mathbf{e}_{\text{out}}$ é o vetor erro de saída. No nosso caso, $\mathbf{e}_{\text{in}}$ depende apenas das estimativas de tempo. O número de condicionamento de uma matriz é um número sempre superior a 1 e seus efeitos no erro são imprevisíveis. De fato, existe até a chance do erro na saída ser menor que o erro na entrada, mas a imprevisibilidade do efeito de matrizes mal-condicionadas faz com que os resultados não sejam confiáveis e, portanto, prima-se pelas matrizes mais bem-condicionadas possíveis.

Existem 2 implicações importantes que seguem da preocupação com o número de condicionamento: a montagem das geometrias dos arranjos e a análise das matrizes surgidas da escolha de pares via ES. Por um lado, a geometria espacial possui vantagens paupáveis

sobre as geometrias linear e plana, tal como uma melhor resolução na determinação do ângulo de elevação e a possibilidade de usar o NLC com a certeza de diminuir o valor do custo e melhorar as estimações dos 3 afixos.

Sobre a escolha de geometria do Phantom 4, o arranjo foi montado e considerado um plano, mas os microfones poderiam ter sido colocados em alturas diferentes para se considerar que estes não fossem coplanares e tornar o arranjo espacial. Porém, como o drone tem de pousar, os microfones não podiam ser predispostos abaixo do drone, significando que tinham um intervalo limitado de valores de altura. Em outras palavras, as diferenças de altura eram muito pequenas em relação ao tamanho das hastes, tornando a matriz $\mathbf{R}$ quase singular. Matrizes quase singulares são mal-condicionadas, significando que o sistema seria mal-condicionado e seus resultados seriam pouco-confiáveis. Portanto, foi decidido que o melhor a se fazer com o drone seria considerar o afixo de elevação das coordenadas do drone nulas e tornar do arranjo um sistema plano.

A influência do número de condicionamento também foi observado quando processando a DoA através do ES. Por um lado um menor número de atrasos considerado tende a diminuir o custo e elimina mais estimativas, diminuindo assim a chance de considerar atrasos comprometidos. Por outro lado, sistemas gerados por um menor número de pares de microfones não apenas possuem menos informação, mas também processam dados de mais matrizes mal-condicionadas. O problema foi estudado analisando os números de condicionamento provenientes dos sistemas obtidos pela ES dos arranjos espaciais de 7 e de 4 microfones (experimento com a EMGEPRON) e o arranjo de 4 microfones plano (experimento com o drone). Como visto na Figura 12, foi observado que o arranjo de 7 microfones pode gerar quantidade considerável de matrizes com números de condicionamento superiores a 100000, podendo causar erros muito grandes. Isto se mostrou uma possível vantagem do arranjo de 4 microfones espacial em relação ao de 7 por gerar matrizes mais bem-comportadas, como visto na Figura 11

Já o arranjo plano de 4 microfones é mais estável que ambos, apresentando matrizes bem-condicionadas no geral como mostrado na Figura 10. O arranjo de 4 microfones plano não apenas gera muito menos possibilidades de matriz, diminuindo a complexidade do cálculo de ES, mas também processa mais matrizes bem-condicionadas em comparação aos arranjos espaciais.

Para eliminar resultados dúbios provenientes de matrizes mal-condicionadas, o algoritmo do ES tem como parâmetro uma cota de condicionamento de forma que o programa não processará medidas de matrizes mal-condicionadas. Para uma aplicação específica, o programa pode ser otimizado ordenando as matrizes e anotando os condicionamentos. Daí, mandando pular os índices de matrizes mal-condicionadas, poupa-se tempo enquanto eliminando matrizes de condicionamento ruim.

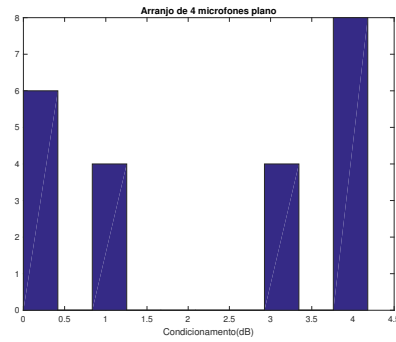


Figura 10 – Histograma com os valores de condicionamento encontrados percorrendo todas as matrizes provenientes do arranjo de 4 microfones plano passando todos os números de pares de ES(3) at(6).

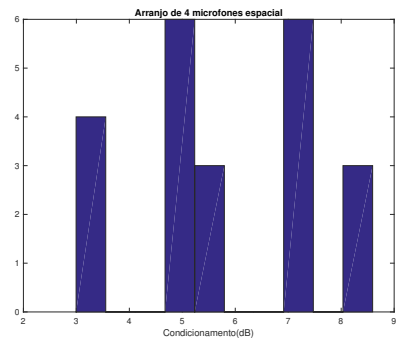


Figura 11 – Histograma com os valores de condicionamento encontrados percorrendo todas as matrizes provenientes do arranjo de 4 microfones espacial passando por todos os números de pares de ES(4) até ES(6).

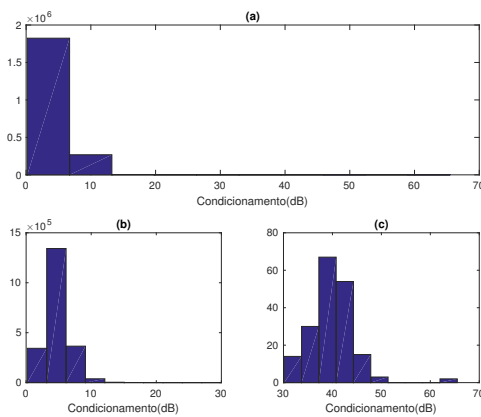


Figura 12 – Histograma com os valores de condicionamento encontrados percorrendo todas as matrizes provenientes do arranjo de 7 microfones passando por todos os números de pares de ES(4) até ES(21). (a) são todos os condicionamentos, (b) são os condicionamentos < 1000 e (c) são os condicionamentos ≥ 1000 .

7 A localização de fonte

Munido das DoAs estimadas de um grupo de 2 ou mais arranjos e de suas posições, é possível traçar as retas provenientes de cada arranjo e observar os encontros de cada par de retas. Em um caso ideal, em que não houvessem erros de medição, todos os encontros seriam coincidentes e este ponto seria dito como sendo a posição da fonte.

Porém, todo sistema real possui erros. Sejam estes de medição, de aferição ou de qualquer outra natureza, existe um limite para a precisão da medida. Consequentemente, percebe-se que os encontros das retas duas a duas não são coincidentes e formam um polígono, como aquele mostrado na Figura 13. A área interior ao polígono é a área de maior probabilidade de localização e a localização da fonte pode ser estimada como sendo um ponto interior a esta utilizando, por exemplo, o métodos de mínimos quadrados (*Least Squares method* ou LS). Também foi considerada a aplicação do método dos mínimos quadrados totais (*Total Least Squares method* ou TLS), mas seu desempenho em simulações não justificou seu uso.

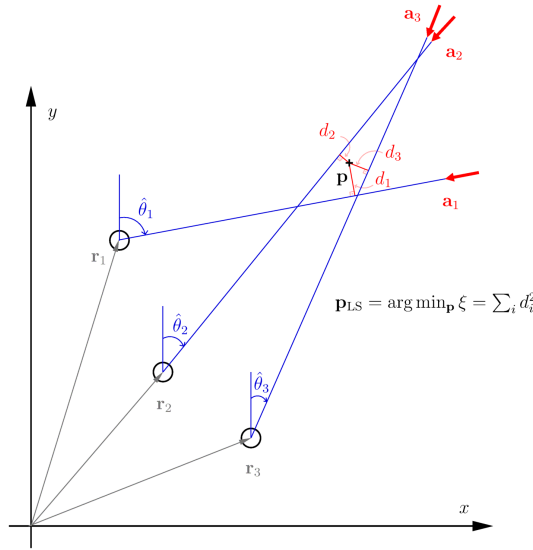


Figura 13 – Encontros das retas determinadas pelas DoAs (republicada de [13] com a autorização dos autores).

7.1 O método dos Mínimos Quadrados

Dado um vetor direção ζ unitário e ângulo ϕ e um ponto $\mathbf{r}$, a reta que passa por $\mathbf{r}$ e tem inclinação ϕ pode ser determinada como:

$$\mathbf{P} = \zeta t + \mathbf{r}, t \in \mathbb{R} \text{ e } \zeta = \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix}$$

Desta forma, o vetor $\bar{\zeta} = \begin{bmatrix} -\sin(\phi) \\ \cos(\phi) \end{bmatrix}$ será ortogonal ao vetor ζ e, portanto:

$$\bar{\zeta}^T \mathbf{P} = \bar{\zeta}^T \mathbf{r} \rightarrow \bar{\zeta}^T \mathbf{P} - \bar{\zeta}^T \mathbf{r} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$$

Em outras palavras, todo ponto contido pela reta determinada por ζ e $\mathbf{r}$ segue a igualdade acima. Desta forma, como ζ e $\bar{\zeta}$ formam uma base do $\mathbb{R}^2$. Assim, para um ponto $\mathbf{p}$ qualquer, a projeção do vetor $\mathbf{p} - \mathbf{r}$ na reta seguirá a igualdade acima, enquanto sua distância $\mathbf{d}$ à reta será dada como:

$$\mathbf{d} = \bar{\zeta}^T (\mathbf{p} - \mathbf{r})$$

Desta forma, considerando o vetor γ como sendo o vetor das distâncias à reta em relação a cada DoA disponível, a matriz $\mathbf{A}$ como tendo em cada linha um $\bar{\zeta}^T$ referente a cada DoA, $\mathbf{p}$ o vetor que tem como suas linhas as coordenadas dos pontos $\mathbf{r}$ e $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{p}$ e sabendo que $\mathbf{b}^T \mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ por se tratar da transposta de um escalar, o problema acima pode ser re-escrito como:

$$\gamma(p) = \mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{b} \rightarrow \gamma^T \gamma = (\mathbf{p}^T \mathbf{A}^T - \mathbf{b}^T)(\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{b}) = 2\left(\frac{1}{2}\mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{p}^T \mathbf{A}^T \mathbf{b}\right) + \mathbf{b}^T \mathbf{b}$$

O objetivo do LS é minimizar $\gamma^T \gamma$. Observa-se que $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ é matriz positivo-definida em todo o $\mathbb{R}^3$ e é a matriz Hessiana de $\gamma^T \gamma$. Ou seja, a função só terá pontos críticos de mínimo. Desta forma, basta encontrar $\mathbf{p}$ que anula o gradiente de γ :

$$\nabla \gamma = 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{p} - 2\mathbf{A}^T \mathbf{b} = 0 \rightarrow \mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

Assim, o ponto que será entregue como fonte sonora no caso de mínimos quadrados será $\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$.

7.2 O método dos Mínimos Quadrados Totais

Uma variação do método dos mínimos quadrados foi introduzido em [10] com o intuito de identificar a posição de emissores eletromagnéticos. Em [12], os algoritmos LS, TLS, Transformada de Hough Generalizada (Generalized Hough Transformed), Filtro de Kalman Sem Rasto (Unscented Kalman Filter ou UKF) e o minimax foram comparados objetivando descobrir qual método resultava no menor erro de estimação da posição. Neste trabalho, o TLS teve o melhor desempenho na maioria dos casos.

Tal método, com sua solução desenvolvida em [9], tem base em fazer a Decomposição em Valores Singulares da matriz $\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix}$. Destes, o menor valor σ_s^2 é determinado e com este a posição é estimada como:

$$\bar{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \sigma_s^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

Utilizando do mesmo método de simulação que será utilizado no capítulo 8, os desempenhos dos algoritmos LS e TLS foram comparados e se encontram na Tabela 4 [13]. As posições dos arranjos e da Área de Impacto para as simulações se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 – Posições utilizadas nas simulações de localização (Republicada de [13] com permissão dos autores)

Posição	X(m)	Y(m)	Z(m)
PO1	1760,1	229,4	6
PO2	1236,8	178,9	7
PO3	0	0	4
ÁREA DE IMPACTO	$1129,2 \pm 500$	$-1482,3 \pm 500$	0

Tabela 4 – Arranjos Lineares alinhados com o eixo x (Republicada de [13] com permissão dos autores)

SNR	ALGORITMO LS		ALGORITMO TLS	
	Erro Médio (m)	Desvio Padrão (m)	Erro Médio (m)	Desvio Padrão(m)
0	725,5297	1177,7411	141189,3600	1400975,7721
5	79,9398	48,3093	80,5447	48,5035
10	20,4685	4,6244	20,4739	4,6266
15	19,6871	4,1106	19,6906	4,1121
20	19,8019	3,5495	19,8046	3,5518

Os algoritmos LS e TLS tiveram desempenhos muito parecidos, assim levando o método LS a ser o preferido para a estimação da localização de fonte por sua relativa simplicidade e pelo foco do trabalho na localização da DoA.

8 Resultados

8.1 Os experimentos com a EMGEPRON

Os temas de localização de fonte foram abordados e estudados objetivando o projeto de um sistema preciso e eficiente de determinação de posição através de gravações de sinais acústicos. Foram realizados 2 tipos de testes: simulações em Software, variando os ângulos da DoA aleatoriamente e aferindo 7 níveis de SNR, de -10 a 20 ao passo de 5dB [13], e experimentos de campo, um na Restinga da Marambaia e outro na fábrica da EMGEPRON [11].

Para os experimentos de campo, os tiros da Marambaia não tiveram o desempenho almejado devido a problemas com a precisão do posicionamento dos arranjos e a determinação da orientação. Portanto, foi aplicado o esquema de calibração descrito na Seção 2.3 no segundo experimento na fábrica da EMGEPRON. A equipe de cartógrafos determinou a posição dos marcos com a maior precisão disponível e também determinou a orientação exata dos arranjos. Foram feitos 4 marcos, 3 para os arranjos e um para o canhão de onde seriam detonadas as cargas que tinham de ser localizadas. Com a orientação precisa vinda da equipe da cartografia, o método de calibração, as técnicas de determinação da DoA e o método LS foi estimada a posição do canhão.

8.1.1 Simulações

Foram realizadas simulações de 500 tiros para cada arranjo fixadas as elevações para compensar o fato do arranjo linear ser incapaz de estimá-la. Os ângulos de varredura também foram limitados a um espaço de 45 a 135°, uma vez que o arranjo linear pode apresentar ambiguidades do lado de onde veio o sinal. Os 3 arranjos tiveram desempenhos similares, com o arranjo de 7 se sobressaindo levemente sobre o arranjo de 4 microfones, supostamente pela presença de mais microfones, tendo o arranjo linear um desempenho levemente melhor que os outros dois para tiros com muito baixa SNR.

Para cada tiro, foi calculado o melhor número de atrasos n para o $ES(n)$, o erro médio e o desvio padrão. Percebe-se que para alta SNR, o maior número de atrasos é considerado, enquanto para baixa SNR, pares comprometidos começam a aparecer mais, e portanto as estimativas com o menor número de atrasos começam a aparecer.

Percebe-se também a efetividade da interpolação na melhoria dos resultados, que portanto foi utilizada no processamento de todos os experimentos de campo. Destas simulações, uma cota de SNR foi estabelecida: foi considerado que sinais acima de 10 dB seriam sinais suficientemente limpos para responder bem ao processamento.

Tabela 5 – Resultados da simulação com arranjo linear (republicado de [13] com autorização dos autores)

SNR	Sem interpolação		Com interpolação		Qtd de Pares
	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	Erro Médio graus	Desvio Padrão (graus)	
-10	2,1328	46,9272	2,1319	46,8738	3
-5	2,2701	44,4722	2,0468	44,7521	3
0	-0,0178	10,8796	-0,0232	10,9238	2
5	0,0888	1,275	0,0521	1,1091	5
10	0,0068	0,1009	0,0048	0,0568	28
15	-0,0107	0,1097	-0,0040	0,0348	28
20	-0,0005	0,1	-0,0005	0,0248	28

Tabela 6 – Resultados da simulação com arranjo espacial de 7 microfones (republicado de [13] com autorização dos autores)

SNR	Sem interpolação		Com interpolação		Qtd de Pares
	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	Erro Médio graus	Desvio Padrão (graus)	
-10	90,2987	105,8288	90,2983	105,8297	4
-5	89,1348	108,0989	89,1357	108,1000	5
0	26,3922	71,5977	26,4294	71,5758	5
5	0,0239	0,5288	0,0208	0,4417	6
10	0,0063	0,1490	-0,0008	0,0909	21
15	0,0081	0,1314	0,0007	0,0547	21
20	-0,0050	0,1207	0,0013	0,0342	21

Tabela 7 – Resultados da simulação com arranjo espacial de 4 microfones (republicado de [13] com autorização dos autores)

SNR	Sem interpolação		Com interpolação		Qtd de Pares
	Erro médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	Erro médio graus	Desvio Padrão (graus)	
-10	86,8948	103,9735	86,8954	103,9727	4
-5	96,8193	106,7054	96,8193	106,7053	5
0	77,2793	105,5131	77,2901	105,5133	4
5	-0,0002	0,3202	0,0001	0,2522	6
10	0,0089	0,2126	0,0050	0,1128	6
15	0,0050	0,1863	-0,0013	0,0632	6
20	0,0065	0,1869	0,0022	0,0371	6

8.1.2 Experimento de campo

Foram realizados 2 experimentos de campo voltados à localização de fonte sonora. O primeiro foi o experimento na Restinga da Marambaia e almejava a localização da posição de impacto de um projétil alto-explosivo acima do nível da água. Infelizmente, por causa

de complicações envolvendo a imprecisão do posicionamento dos arranjos, imprecisão da orientação dos arranjos e a confiabilidade relativamente baixa da estimativa da posição de alvo, a identificação da fonte não foi muito bem sucedida. Porém, o experimento ainda foi valioso por permitir um teste da performance do NLC em um sinal real, como mostrado na Figura 9. As posições dos arranjos e as estimativas da posição da fonte se encontram na Tabela 8 e na Figura 14 respectivamente.

Tabela 8 – Posições dos 3 arranjos de microfones para o experimento da EMGEPRON (republicado de [11] com autorização dos autores)

Marco	Leste(m)	Norte(m)
Po-1	620953.90	7448553.42
Po-2	620697.49	7448518.58
Po-3	620210.36	7448553.42

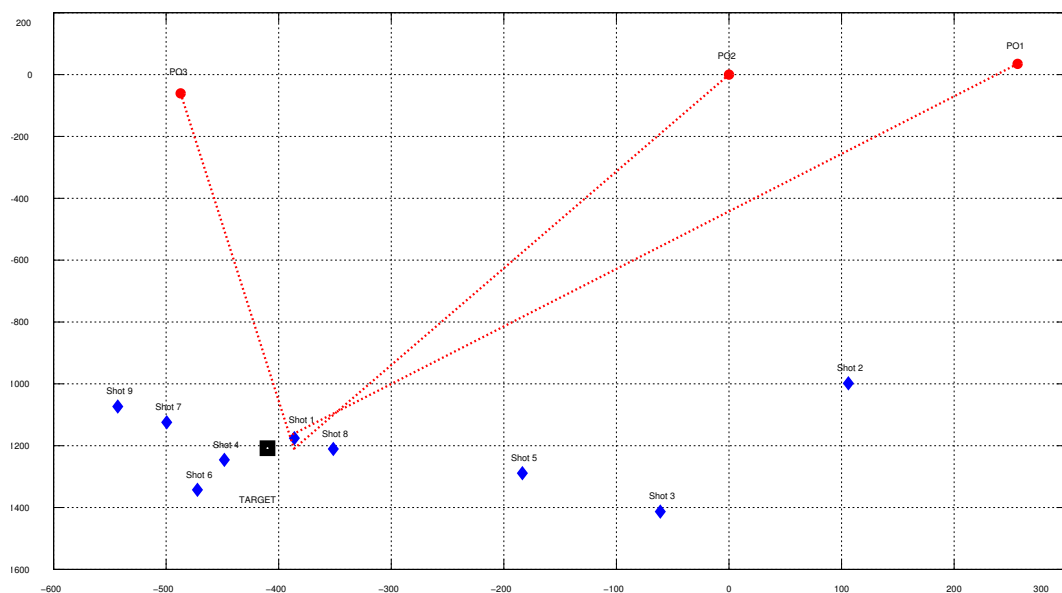


Figura 14 – Estimação da posição de impacto de um projétil alto-explosivo (republicada de [11] com a autorização dos autores).

Os problemas de precisão que já haviam se tornado rotineiros motivaram a criação do esquema de calibração descrito na Seção 2.3, testado no Jardim do IME mas posto à prática em conjunto com as medidas Cartográficas no segundo experimento de campo, o experimento na fábrica da EMGEPRON. Foram feitos 3 marcos para os 3 arranjos de microfone, com as posições sendo determinadas pela equipe de cartógrafos que acompanhou o experimento.

Com as posições determinadas utilizando equipamento cartográfico operado por profissionais da área, foram feitos os 9 tiros de calibração, 3 em cima de cada arranjo. Cada

Tabela 9 – Coordenadas dos arranjos e suas correções (republicada de [11] com autorização dos autores)

Marco do arranjo	x (em m)	y (em m)	Correção via Calibração	Correção Cartográfica
PO-1	645101.411	7472118.133	-10.3176°	-10.3774°
PO-2	645102.899	7472088.241	83.8370°	81.2892°
PO-3	645105.056	7472057.998	93.1983°	92.6392°

arranjo receberia, portanto, 6 sinais de calibração dos quais seriam retiradas 6 constantes de calibração. Destas 6, a combinação de 3 constantes com o menor desvio padrão seriam escolhidas e sua média seria utilizada como calibração. Também foram determinados os desvios utilizando o equipamento cartográfico, com o intuito de comparar os resultados. Como o arranjo linear não consegue estimar elevação, teve de ser feita uma correção dos seus resultados para compensar as diferenças de altura. Como todos seus dados foram comprometidos por estes, o arranjo linear no caso prático sem restrições de altura teve os piores resultados. Os marcos dos arranjos e as constantes de calibração e suas comparações aos desvios encontrados pelo equipamento cartográfico estão na Tabela 9.

Nota-se que a calibração do Po-1 teve resultados bem próximos relativos à estimação dos cartógrafos, significando que o método de calibração foi bem-sucedido. O arranjo com o pior desempenho foi o Po2, o arranjo linear, como esperado devido às suas limitações em comparação aos outros dois. A proximidade do resultado é especialmente notável pois o esquema de calibração, uma vez conhecido os marcos, precisa apenas realizar o processamento dos tiros de calibração e não necessita de nenhum equipamento além dos arranjos, enquanto o equipamento cartográfico é pesado, caro e leva bastante tempo processando os dados necessários para realizar as estimativas.

Gravados os 9 sinais de calibração, foram feitos 6 detonações da carga na posição alvo correspondente ao canhão e suas posições foram estimadas usando tanto a SE quanto a NLC, sendo estes calibrados tanto usando a correção via calibração quanto a correção cartográfica para comparar os métodos em sua totalidade. Os resultados finais do experimento de localização de fonte estão dispostos na Figura 15.

Claramente, o NLC ajudou a melhorar as estimativas, diminuindo distâncias relativas entre as estimações. A calibração também apresentou resultados muito próximos dos desvios estimados pelos profissionais da SE/6, validando o método de calibração. Desta forma, o experimento retornou os resultados desejados. Com a consolidação e aprimoração dos métodos de estimativa de DoA, o método foi adaptado para o caso plano e utilizado no experimento com o drone, descrito a seguir.

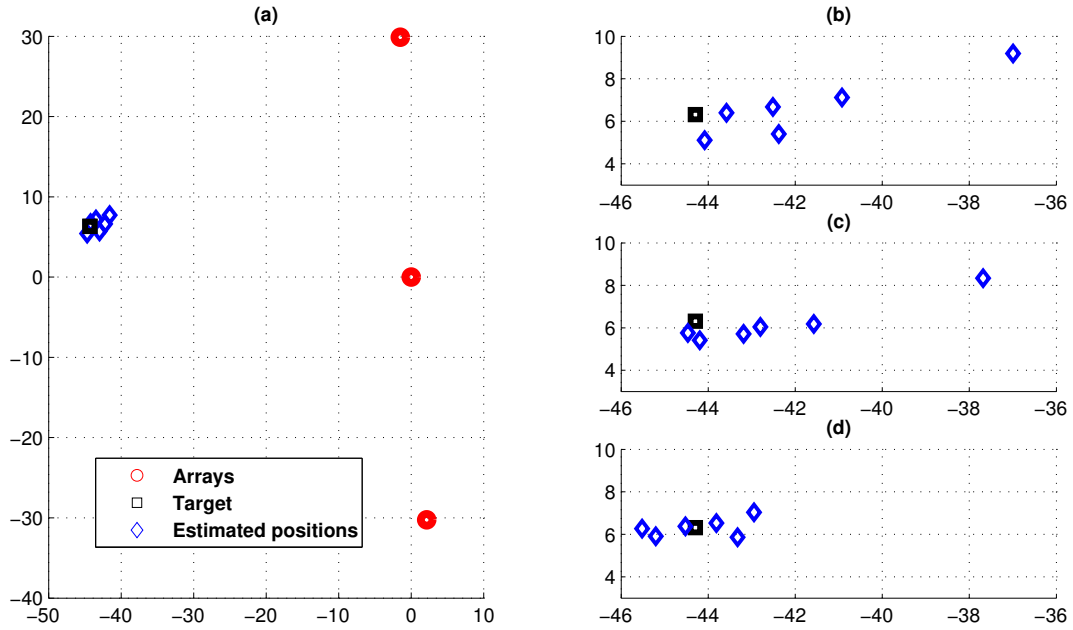


Figura 15 – Estimação da posição do canhão localizado na fábrica da EMGEPRON, em que: (a) é a estimativa com o NLC e a correção Cartográfica, (b) é o resultado sem o NLC e com a correção Cartográfica, (c) é a estimativa sem o NLC e com a correção via calibração e (d) é a estimativa com o NLC e com a correção via calibração (republicada de [11] com a autorização dos autores).

8.2 O experimento com o drone

Assim como no caso da localização de fonte, foram feitos 2 tipos de experimentos para o caso planar do drone: o primeiro consistiu de simulações em software que foi adaptado para o uso do arranjo plano e almejava apenas testar a precisão do método, variando o azimuth e o zênite de cada tiro aleatoriamente e aferindo SNRs variáveis, analogamente à simulação para a localização de fonte. Na simulação, os valores de elevação foram contidos em um intervalo de $[45^\circ, 135^\circ]$, uma vez que elevações próximas aos extremos gera problemas na precisão da determinação do ângulo de varredura.

Em seguida, tiveram os experimentos de campo. Com a consolidação das técnicas de encontrar a DoA, as técnicas foram adaptadas para o caso plano e foram realizados 9 tiros na pista de atletismo da EsEFEx, 3 para cada altura diferente: 25, 50 e 100 metros.

A equipe de cartógrafos da SE/6 que foi levada ao experimento fez 2 marcos na pista: Um de onde partiria o drone e o marco de onde seriam realizados os tiros. A partir desse, o drone subiu tentando se locomover o mínimo possível horizontalmente. Inicialmente, o drone subiu a uma altura de 100 metros, de onde foram feitos os 3 tiros: 1 de calibração seguido de 2 tiros de localização. Daí, o processo foi repetido para 50 e 25 metros e os resultados foram registrados na Figura 17 e na Tabela 14.

8.2.1 Simulações

Para o caso do drone, o programa foi adaptado para aceitar o arranjo descrito na Tabela 1 e foram realizados 100 tiros com azimuth e zênite gerados aleatoriamente. A média e o desvio padrão dos erros da estimativa foram calculados variando o número de atrasos de ES(3) a ES(6) e estão dispostos nas Tabelas 10 e 11. Desta vez, foram anotados os resultados de todos os ESs, por se tratar de menos valores.

Como esperado, o aumento do SNR aumenta a precisão da estimativa. Assim, sabe-se que o modelo plano desenvolvido era apropriado e poderia ser aplicado ao caso real.

Tabela 10 – Médias dos erros estimados na simulação

SNR	ES(3)	ES(4)	ES(5)	ES(6)
-10	2,6696	15,2630	6,7375	-10,0981
-5	-9,9736	-12,7019	-3,2898	-19,0803
0	8,6399	7,0445	-10,8327	-17,4490
5	-0,3888e-03	0,9249e-03	-0,3970e-03	0,2510e-03
10	-0,0005	-0,0002	-0,0011	-0,0008
15	-0,2231e-03	-0,2304e-03	-0,1082e-03	-0,4450e-03
20	-0,578 e-04	-0,303e-04	-0,800e-04	-0,966e-04

Tabela 11 – Desvios padrão dos erros estimados na simulação

SNR	ES(3)	ES(4)	ES(5)	ES(6)
-10	135,2664	138,3048	154,1064	153,3128
-5	167,2514	127,0412	149,1094	131, 8756
0	124,4436	143,3040	128,5950	139,1546
5	0,0077	0,0088	0,0060	0,0057
10	0,0051	0,0049	0,0041	0,0045
15	0,0054	0,0051	0,0046	0,0037
20	0,0055	0,0050	0,0045	0,0042

8.2.2 Experimento de campo

Consolidado o método e comprovada a sua efetividade, o drone foi levado com o gravador para a pista de atletismo da EsEFEx no dia 14 de setembro de 2017. A equipe cartográfica da SE/6 que acompanhou o experimento marcou tanto o ponto de onde decolaria o drone quanto o ponto de onde seriam disparados os sinais de tiros, nas posições colocadas na Tabela 12 abaixo:

Foram então disparados 9 tiros de festim da mesma posição, 3 para o drone a uma altura de 25 m, 3 para uma altura de 50m e 3 para uma altura de 100 m. Destes 3 tiros, 1 deles foi usado como tiro de calibração para os outros 2, conseguindo as orientações

Tabela 12 – Posições dos pontos de interesse em UTM

Ponto	X(m)	Y(m)
drone	688981, 307	7461369,262
Atirador	689026,666	7461379,232

aproximadas do drone nos instantes dos tiros. Infelizmente, o método de calibração não é ideal para o tiro com o drone por não ser muito prático. Seria mais próprio saber a orientação instantânea para referenciar no momento do tiro e saber o azimuth em função a uma referência universal, como o norte geográfico por exemplo. Para o experimento, que almejava apenas determinar a precisão do método de determinar a DoA no drone, o método foi suficiente. As constantes de correção em relação a cada altura se encontram na Tabela 13.

Outro problema foi o posicionamento do próprio drone. Foi feito um marco geográfico muito preciso do ponto de decolagem do drone, mas houve deslocamento deste no plano xy durante o voo. Foi considerado que o deslocamento do drone foi pequeno o suficiente para não interferir nas medidas. Ao pousar, o drone marcou um deslocamento inferior a 1,5 metros, um erro menor que o esperado caso fosse utilizado algum serviço de GPS-tracking automático que não fosse voltado para a aplicação, considerando que este nível de precisão não é pertinente para aplicações mais comuns.

Tabela 13 – Calibração do drone para cada altura

Altura(m)	Calibração(°)
25	136,4650
50	113,2436
100	120,4549

Identificadas as calibrações, os 2 tiros remanescentes de cada altura foram tratados usando o SC e a MF para melhorar suas SNRs e assim, melhorar suas estimativas. Infelizmente, uma ventania acabou inserindo um ruído que abafou o sinal de tiro em um dos microfones, como se pode ver na Figura 16. Desta forma, um dos tiros a 25 metros acabou perdendo o sinal de um dos microfones, o que resultou em uma medida absurda mesmo utilizando ES(3), uma vez que o efeito do problema nas gravações previsível.

Como foi mostrado na Figura 5, os métodos de tratamento de sinal tiveram resultados muito satisfatórios. Os sinais se encontravam muito fracos em relação ao ruído, mas após o tratamento, mesmo os tiros capturados a 100 metros de altura foram suficientemente melhorados para a aplicação própria do método e estimativa da DoA. Após estudo cuida-

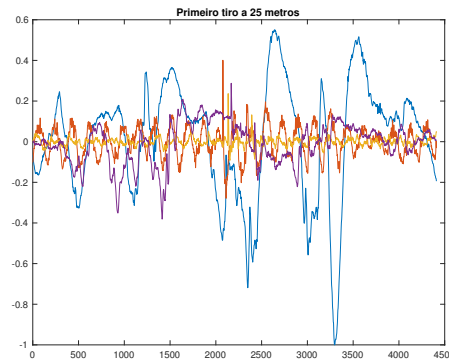


Figura 16 – Sinal de tiro comprometido, captado a 25 metros do chão destratado.

doso, foi escolhido o uso da melhor estimativa de 3 atrasos (ou seja, $ES(3)$) por ser aquela que encontrou as melhores estimativas de elevação para todas as alturas, dadas na Tabela 16.

As estimativas dos azimutes foram medidas com e sem o critério do NLC, e as medidas acabaram muito parecidas. Diferente do caso espacial, o NLC não parece melhorar muito medidas que já estão boas de DoA no caso plano. Porém, percebeu-se que os tiros provenientes de medida do NLC deixam um espaço para erro menor nos 3 casos (as medidas são mais próximas).

Por causa do problema imprevisto da ventania, os tiros a 25 metros acabaram retornando o pior resultado. Porém, os tiros a 50 metros retornaram resultados excelentes, com ou sem NLC, enquanto os tiros a 100m também retornaram bons resultados. Como pode ser visto na Tabela 14 e na Figura 17, o uso do NLC retorna resultados muito próximos da SE e até melhorou a estimativa de um dos tiros, mostrando que possivelmente o NLC deva ser aplicado como um critério de tentativa de correção para o caso da DoA encontrada ter norma superior a 1 (caso em que o arranjo plano é incapaz de determinar a elevação de qualquer forma) ou em casos em que a elevação é irrelevante.

Tabela 14 – Tabela com os resultados dos azimutes relativos ao Norte encontrados em graus

Tiro	25 metros		50 metros		100 metros	
	SE	NLC	SE	NLC	SE	NLC
1	-42,4541	6,5369	13,0296	12,8671	12,2890	11, 7188
2	11, 6594	13,7878	12,2265	12,3740	13,6347	13,0744

O drone foi escolhido como a origem dos eixos para facilitar a visualização das distâncias. Como não é considerada necessária uma calibração para determinar o ângulo de elevação (considera-se que o arranjo se encontra paralelo ao chão a todo momento),

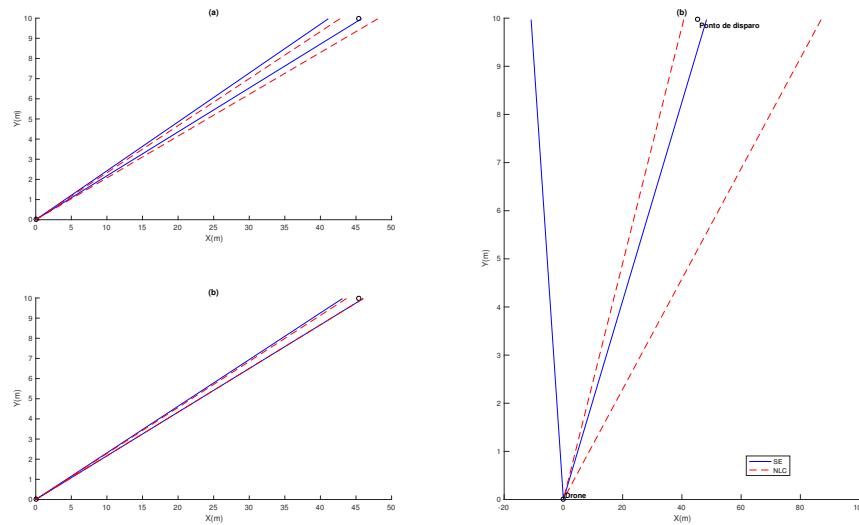


Figura 17 – Estimativas de DoA nas diferentes alturas. (a) são as estimativas a 100 metros do chão, (b) a 50 metros do chão e (c) a 25 metros do chão.

Tabela 15 – Tabela com os resultados dos ângulos de elevação estimados em graus

Tiro	25 metros	50 metros	100 metros
Calibração	115,4976	130,3469	152,7661
1	151,3020	129,9794	150,6646
2	115,7756	128,5436	152,0957

Tabela 16 – Tabela com as estimativas de altura em metros

Tiro	25 metros	50 metros	100 metros
Calibração	22,1493	54,6714	87,6973
1	84,8345	55,3876	90,2346
2	22,4265	58,2943	82,6386

pode-se levar em consideração os 3 tiros na tentativa de se determinar a altura. Como a melhoria NLC no caso plano só auxilia na determinação do azimuth, a medida comprometida não teve qualquer aprimoramento.

Utilizando os dados da Tabela 12, tem-se que o azimuth esperado em relação ao norte é de $12,3966^\circ$ e a distância entre o drone e o atirador foi de 46,4418 metros. A partir desta, a altura é estimada usando os ângulos de elevação estimados na Tabela 15 e a aplicação de trigonometria, conforme ilustrado na Figura 18. Como era de se esperar, a precisão da altura encontrada diminuiu com a altura do drone, fora o resultado do tiro afetado pela ventania.

Observando a Tabela 14, percebe-se que o NLC ajudou a aprimorar este resultado

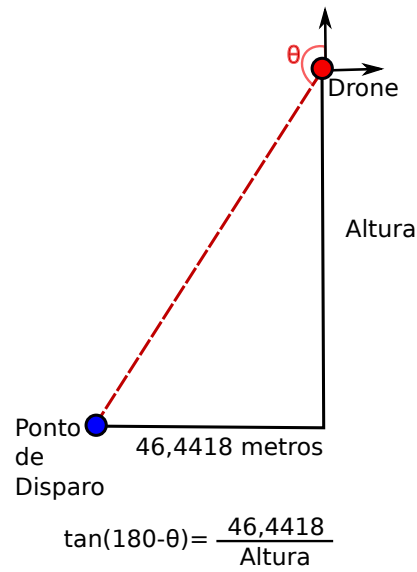


Figura 18 – As alturas são estimadas com o ângulo de elevação e trigonometria simples.

dando respostas menos distantes entre si, inclusive consertando uma medida muito fora do esperado. Percebeu-se também que as estimativas de altura não ficaram tão próximas quanto as estimativas de azimuth, consistente com a teoria.

Conclusão

O foco do trabalho é a estimação da DoA a partir de sinais gravados de um drone. Apesar do ruído intenso causado pelas hélices e dos problemas relacionados ao arranjo plano, o azimuth foi estimado com grande precisão tanto através de simulações em Software quanto no estudo de uma situação real. A elevação, previsivelmente, não teve o mesmo sucesso, mas esta imprecisão era esperada.

Também foi abordado o tema de localização de fonte sonora utilizando as DoAs gravadas por 3 arranjos de microfones através de métodos de mínimos quadrados. O caso é corroborado por um grupo de simulações e 2 experimentos de campo. A teoria utilizada para estimar a DoA tridimensionalmente usada primariamente no caso da localização de fonte serviu de base para a montagem de um modelo bidimensional.

As simulações em Software foram feitas pegando um sinal de tiro relativamente limpo e superpondo este a um ruído gerado aleatoriamente, com a SNR e a DoA controladas pelo usuário. São gerados vários sinais distintos, com o mesmo número de sinais de ruído distintos e o mesmo sinal de tiro sendo colocado com uma defasagem referente à DoA desejada para aquele microfone. A partir daí, o sinal gerado era submetido ao método e a DoA estimada era armazenada. Ao final de 100 iterações com DoAs geradas aleatoriamente para o caso do drone e 500 para o caso dos arranjos estacionários, os resultados foram comparados e foi observado que sinais com SNR maior ou igual a 10 possuíam precisão muito boa.

Para o tratamento do sinal sonoro, foram aplicados os métodos de Recorte do Sinal e de Filtragem Mediana, que reduziram a influência do ruído e de reflexões dando aos sinais a forma desejada mesmo para os sinais gravados a 100 metros de altura. Como era esperado, os sinais do drone foram recebidos com uma presença muito forte do ruído, mas o sinal após o tratamento tinha um formato mais próximo do ideal. A exceção a isto foi um tiro que foi perdido devido a uma ventania que afetou um dos microfones e forçou uma estimativa usando um microfone a menos.

Algoritmos e métodos criados para o caso espacial foram adaptados para o caso plano e uma nova forma de se determinar elevação foi estabelecida para o método SE. Sem o terceiro eixo do vetor da DoA para determinar o ângulo de elevação apropriadamente, este tem de ser determinado através da norma do vetor bidimensional encontrado. Esta estimativa está sujeita não apenas a erros na estimativa da DoA comuns ao caso espacial, como também erros no valor da norma da DoA encontrada, que serão imperceptíveis para o arranjo de geometria plana.

Outro método de determinação da DoA discutido foi o NLC, método utilizado para aprimorar as medições de DoA espaciais restringindo a resposta a um vetor unitário. O

método é aplicado ao caso plano na esperança de melhorar estimativas que não tiveram norma inferior a um. Assume-se que o vetor unitário que minimiza o custo está alinhado com a projeção da DoA no plano horizontal e, portanto, o NLC poderia ser utilizado para determinar o azimute com melhor precisão.

É sugerido um algoritmo que universaliza a função Busca Exaustiva, proposta em [5], com um algoritmo que perpassa todas as possíveis combinações sem repetição ou operações supérfluas. Foi colocado em anexo um programa em Matlab que executa a função ES levando em consideração a norma do vetor e o condicionamento da matriz que entregou o resultado.

O condicionamento de matriz e seu papel no erro do problema é discutido. Matrizes mal-condicionadas podem apresentar resultados de baixa confiabilidade devido ao amplo espaço por onde pode caminhar o erro. Devido a limitações inerentes ao problema, como a estrutura física do drone, a tentativa de transformar o sistema em uma geometria espacial resultaria em um sistema muito mal-condicionado, e portanto de resultados dúbios. Portanto, o arranjo proposto teve de ser feito plano. Analisando os condicionamentos das matrizes que podem surgir realizando o ES, percebeu-se que o sistema bidimensional é muito bem-condicionado, garantindo uma transmissão do erro de forma mais própria.

O método dos Mínimos Quadrados é explicado e comparado ao método dos Mínimos Quadrados Totais e, após ambos sofrerem diversas simulações, não foi percebida uma diferença de desempenho grande, tornando o LS simples o método escolhido devido à sua facilidade de uso e de aplicação.

Os testes práticos de localização de fonte são descritos e são explicados os resultados. Para o primeiro experimento na Marambaia, a imprecisão das medidas de posição e orientação dos arranjos levou à elaboração de um esquema de calibração que é aplicado a um segundo experimento com marcos topográficos e orientações muito precisas, medidas por especialistas da SE/6. Os resultados do desvio estimado são comparados e o método de calibração é aplicado, retornando resultados precisos e comparáveis a aqueles estimados com o desvio calculados pela equipe topográfica, sem a dependência dos mesmos cuidados e limitações do equipamento Topográfico.

Os testes práticos com o drone foram realizados na pista de atletismo da Escola de Educação Física do Exército (EsEFEx) e tiveram resultados bons. O NLC apresentou melhora em relação ao SE para determinar o azimute mesmo para o caso plano, tendo seus resultados divergido menos entre si. Mesmo assim, os resultados dos tiros que não tiveram problemas ficaram muito bons, próximos do azimute em relação ao norte que era esperado para o tiro. A estimativa da altura, por depender da estimativa da elevação, não ficou tão boa quanto o caso espacial com uma tendência de perder precisão com a maior distância.

Bibliografia

- [1] Set. de 2017. URL: <https://www.dji.com/phantom-4/info>.
- [2] Set. de 2017. URL: <https://www.marinha.mil.br/emgepron/pt-br>.
- [3] R. B. Blackman e J. W. Tukey. “The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering — Part I”. Em: *The Bell System Technical Journal* 37.1 (jan. de 1958), pp. 185–282.
- [4] A. M. C. R. Borzino, J. A. Apolinário Jr. e M. L. R. de Campos. “Consistent DoA estimation of heavily noisy gunshot signals using microphone array”. Em: ().
- [5] A. M. C. R. Borzino, J. A. Apolinário Jr. e M. L. R. de Campos. “Robust DOA estimation of heavily noisy gunshot signals”. Em: *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (abr. de 2015), pp. 449–453.
- [6] A. M. C. R. Borzino et al. “Signal enhancement for gunshot DOA estimation with median filters”. Em: *2015 IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits Systems (LASCAS)* (fev. de 2015).
- [7] B. V. D. Broeck et al. “Time-domain generalized cross correlation phase transform sound source localization for small microphone arrays”. Em: *5th European DSP Education and Research Conference (EDERC)* (2012), pp. 76–80.
- [8] Izabela L. Freire e J. A. Apolinário Jr. “DoA of gunshot signals in a spatial microphone array: performance of the interpolated generalized crosscorrelation method”. Em: *6th Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA 2011)* (2011).
- [9] I. Markovsky e S. Huffel. “Overview of Total Least Squares methods”. Em: *Signal Processing* 87 (2007), pp. 2283–2302.
- [10] K. D. Rao e D. C. Reddy. “A new method for finding electromagnetic emitter location”. Em: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 30 (1994), pp. 1081–1085.
- [11] Juliano G. C. Ribeiro et al. “Improved DoA estimation with application to bearings-only acoustic source localization”. Submetido ao 2017 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. 2017.
- [12] Edilson Celestino dos Santos, José A. Apolinário Jr. e José C. Araujo dos Santos. “Avaliação de desempenho de algoritmos de localização de emissores de RF baseados em medidas de marcação em um cenário naval”. Em: *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais 2016* (2016).

- [13] F. G. Serrenho, J. G. do Carmo Ribeiro e J. A. Apolinário Jr. “Localizando ponto de impacto de projétil Alto Explosivo (AE), empregando arranjo de microfones”. Em: *Proc. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT’17)* (2017).
- [14] J. Stoer e R. Bulirsch. *Introduction to Numerical Analysis, Second edition*. Second. Springer Science+Business Media, LLC, 1974.

Anexos

ES Generalizado

O programa de Matlab que executa a função foi colocado abaixo expondo o algoritmo do ES.

```

1 function [aDoA,err_real,condition]=ES(tau, deltap, p, tol,cond0)
2 error=@(t,d,a) (t-d*a)'*(t-d*a)/length(t);%Func. de erro onde t
    representa o os atrasos, d representa as diferencas de
    posicao e a representa a DoA
3 condition=10^6;%Valor arbitrariamente alto de numero de
    condicionamento
4 pos=1:p;% "Enderecos" originais da selecao.
5 n=length(tau);
6 teste=zeros(p,1);
7 Tau=teste;
8 newdeltap=zeros(p,3);
9 Deltap=newdeltap;
10 for i=1:p
11     teste(i,1)=tau(i);
12     Tau(i,1)=tau(n-p+i);
13     Deltap(i,:)=deltap(n-p+i,:);
14     newdeltap(i,:)=deltap(i,:);
15 end
16 R=Deltap'*Deltap;
17 newp=Deltap'*Tau;
18 aDoA=-R\newp;
19 aDoA=aDoA/norm(aDoA);
20 err=1;%Valor inicial do erro. Representa o valor do erro da
    ultima amostra processada
21 err_real=1;
22 while(pos(1)<=n-p+1)%A ideia e movimentar o bloco de p amostras
    de forma a percorrer todas as
23     %permutacoes possiveis, sendo estes enderecos crescentes. Ou
        seja, o
24     %loop continua enquanto o primeiro endereco tiver valor
        menor que o
25     %valor maximo.

```

```

26 for i=pos(p):n%Registra a variacao do ultimo endereco, que e
    sempre o maior
27     teste(p)=tau(i);%Atualiza do tau do ultimo endereco
28     newdeltap(p,:)=deltap(i,:);%Assim como o vetor diferenca
        associado a esse tau
29     newR=newdeltap'*newdeltap;%Atualiza o R e o p
30     newp=newdeltap'*teste;
31     newAdoa=-newR\newp;%Calcula a nova DoA
32     %newAdoa=newAdoa/norm(newAdoa);%Normaliza
33     errs=error(teste,newdeltap,newAdoa);%Calcula a funcao erro
34     if(errs<err&&abs(norm(newAdoa)-1)<tol&&cond(newR)<cond0)%
        Substitui o valor de aDoA se o erro for menor, se a
35         %norma for plausivel para um vetor supostamente unitario
            e se a matriz que retornou essa DoA for
                suficientemente
36         %Bem-condicionada
37         err=errs;%Assume o valor do erro anterior, assim como
            todos os valores relevantes
38         aDoA=newAdoa;
39         err_real=error(teste,newdeltap,aDoA/norm(aDoA));
40         condition=cond(newR);
41     end
42 end
43 i=2;
44 while(pos(i)~=n-p+i&&i<p)
45     i=i+1;
46 end%Encontra qual endereco precisa ser atualizado. Basicamente,
    o m-esimo endereco
47 %pode preencher as posicoes de m ate n-p+m, e se atingir essa
    posicao, e
48 %hora de mandar o anterior 1 para frente.
49 p0=pos(i-1);
50 for j=i-1:p-1
51     pos(j)=p0+j-i+2;
52     newdeltap(j,:)=deltap(pos(j),:);
53     teste(j)=tau(pos(j));
54 end%Caso um endereco chegue no seu maximo, a lista de enderecos
    e atualizada
55 %Assim como as posicoes a ser pegas e os taus.

```

```
56 pos(p)=pos(p-1)+1;
57 %A ultima fica fora do loop pois e atualizada no for de qualquer
    forma.
58 end
59 aDoA=aDoA/norm(aDoA);
```