

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE DEFESA

RIGEL PROCÓPIO FERNANDES

ANÁLISE DO MOVIMENTO DE ALVOS A PARTIR DE SINAIS
CAPTADOS POR UM VANT

Rio de Janeiro
2017

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RIGEL PROCÓPIO FERNANDES

**ANÁLISE DO MOVIMENTO DE ALVOS A PARTIR DE
SINAIS CAPTADOS POR UM VANT**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Defesa.

Orientador: Prof. José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc.
Co-orientador: Prof. António Luiz Lopes Ramos - Ph.D.

Rio de Janeiro
2017

c2017

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, microfilmar 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 autor e do orientador.

004 Fernandes, R. P.
F363 Análise do movimento de alvos a partir de sinais captados por um VANT/ Rigel Procópio Fernandes, orientado por José Antonio Apolinário Jr. e Antônio Luiz Lopes Ramos - Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017.
46 p.: il., tab.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2017.

1. VANT. 2. DoA. 3. TMA I. Modelo de Estimação de Atirador. II. Instituto Militar de Engenharia.

CDD 004

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RIGEL PROCÓPIO FERNANDES

ANÁLISE DO MOVIMENTO DE ALVOS A PARTIR DE
SINAIS CAPTADOS POR UM VANT

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Defesa do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Defesa.

Orientador: Prof. José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc.

Co-orientador: Prof. António Luiz Lopes Ramos - Ph.D.

Aprovada em 26 de junho de 2017 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc. do IME - Presidente



Prof. António Luiz Lopes Ramos - Ph.D. da HSN (Noruega)



Prof. Paulo Fernando Ferreira Rosa - Ph.D. do IME



Prof. Wallace Alves Martins - D.Sc. da COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro
2017

Dedico esta dissertação a Deus e a minha avó (*in memoriam*) que sempre me encorajou a encarar os desafios e as adversidades da vida através da fé.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação não teria sido possível sem a ajuda e orientação de diversas pessoas que de um jeito ou outro contribuíram com valorosa assistência na preparação e finalização deste estudo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Antonio Apolinário Jr. e co-orientador Prof. Dr. António Luiz Lopes Ramos pela imensa ajuda prestada em me guiar pelo campo da pesquisa científica, além de toda compreensão que pude ter em momentos difíceis que passei.

Agradeço aos meus superiores hierárquicos no meu trabalho pela confiança depositada e forte apoio em meus estudos, em especial ao CF Auro, Eng. Cláudio e Eng. Cláudia Reis.

Gostaria também de mostrar minha gratidão aos meu pais, amigos e colegas de laboratório TC Borzino, Maj Valim e CT Celestino pela ajuda prestada e apoio moral. Devo especial agradecimento ao técnico em eletrônica Bonfim por sua ajuda na coleta de sinais em campo.

Rigel Procópio Fernandes

“Só o conhecimento liberta o homem.”

Dr. Enéas Ferreira Carneiro

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 O problema da localização do atirador	16
1.1.1 Definição do problema	16
1.1.2 Sinais acústicos de tiros	18
1.2 O problema da estimação de parâmetros de TMA usando um VANT	18
1.3 Objetivos	19
1.4 Revisão de literatura	21
1.5 Contribuições deste trabalho	23
1.6 Organização da dissertação	23
2 ARCABOUÇO CONCEITUAL	25
2.1 Melhoramento de sinais	25
2.1.1 Filtragem adaptativa	26
2.1.2 Subtração espectral	27
2.1.3 Filtro de mediana	28
2.2 Estimação de direção de chegada	29
2.2.1 Solução de estimação 3D	29
2.2.2 Solução de estimação 2D	31
2.3 Análise de movimento de alvos	32
2.3.1 Técnicas para alvos fixos	33
2.3.1.1 Pressupostos para a localização de alvos fixos	34
2.3.1.2 Mínimos quadrados lineares	34
2.3.1.3 Mínimos quadrados totais	36
2.3.2 Técnicas para alvos em movimento	36
2.3.2.1 Pressupostos para a localização de alvos em movimento	36
2.3.2.2 Estimador pseudolinear	39
2.3.2.3 Estimador pseudolinear com compensação de polarização	39
2.3.2.4 Estimador de variáveis instrumentais	40

2.3.2.5 Casos particulares do modelo de estimação com aceleração constante	41
3 MODELAGEM DO PROBLEMA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA ALVOS FIXOS	43
3.1 Simulações	44
3.1.1 Modelo dos sinais	44
3.1.2 Resultado das simulações	45
3.1.2.1 Estimação de DoA dos sinais sintetizados	46
3.1.3 Resultados em ambientes reais	48
3.1.4 Aquisição de sinais	48
3.1.4.1 Resultados da estimação de DoA	51
3.1.4.2 Estimação da localização	52
3.2 Discussão	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE A ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE TMA	60
4.1 Cenário e o problema de estimação de parâmetros de alvos em movimento ..	61
4.2 Resultados das Simulações	64
4.2.1 Desempenho dos modelos de velocidade constante e aceleração constante	65
4.2.2 Papel da trajetória no desempenho do estimador	67
4.2.3 Distância entre observador e alvo	68
4.2.4 Velocidade do observador	69
4.2.5 Taxa de marcações necessária	69
4.2.6 Sensoriamento em um cenário tático naval	70
4.3 Discussão	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1 Conclusões	73
5.2 Limitações e sugestões para futuras pesquisas	75
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.2.1	Geometria de TMA considerada nesse trabalho para a parte de localização de alvo fixo.	35
FIG.2.2	Geometria de TMA considerada nesse trabalho.	38
FIG.3.1	SNR estimada \times distância para um rifle 7,62mm (FAL).	46
FIG.3.2	Posições do observador em que os sinais de tiro são coletados.	47
FIG.3.3	Ilustração das marcações sem ruído que produzem uma única interseção.	48
FIG.3.4	<i>Muzzle blast</i> modelada de um rifle FAL, afastada 50 m da posição do observador (à esquerda) e afastada 150 m da posição do observador (à direita). (a) e (b) sem técnica de melhoramento do sinal. (c) e (d) com subtração espectral. (e) e (f) com filtro de mediana.	56
FIG.3.5	Arranjo de microfones montado na base do quadricóptero AR Parrot 2.0 Drone. Visão da parte inferior do drone.	57
FIG.3.6	Sinais de tiro (IA2 7,62mm) coletados de um VANT. Gráficos da parte superior foram coletados a uma distância de 58,3 m observador-atirador e os gráficos da parte inferior a uma distância de 127,2 m observador-atirador: (a) e (d) sinais sem pré-processamento; (b) e (e) subtração espectral; (c) e (f) filtro de mediana.	57
FIG.3.7	Geometria de TMA.	58
FIG.3.8	(a) Relação entre a média do erro de estimação de DoA & distância. (b) Histograma do erro.	58
FIG.3.9	Estimações da localização do atirador: note que as melhores estimativas são aquelas com a menor distância do atirador-VANT e dentro de um ângulo que não configura um alvo não-observável.	59
FIG.4.1	(a) Exemplo do início de uma trajetória de um observador em um cenário tático naval. (b) O observador permaneceu com os mesmos parâmetros fazendo com que o alvo seja não observável.	62
FIG.4.2	(a) Exemplo de um alvo observável com um observador em uma corrida com duas pernadas (b) Exemplo de um alvo observável com um observador em uma trajetória com quatro pernadas.	63

FIG.4.3	Geometria de TMA com as posições do observador e do alvo no momento das estimações. Alvo com parâmetros $\mathbf{p}_0 = [50100]$, $\mathbf{v} = [-2 - 8]$ e $\mathbf{a} = [-0.51.5]$	64
FIG.4.4	Polarização dos estimadores versus desvio padrão do ruído das marcações (em graus) com $N = 40$. (a) Alvo em velocidade constante (b) Alvo com aceleração constante.	65
FIG.4.5	Posições estimadas do alvo a partir do vetor de parâmetros estimado $\hat{\xi}$	66
FIG.4.6	Polarização dos estimadores versus desvio padrão do ruído das marcações (em graus) em uma trajetória com duas pernadas.	66
FIG.4.7	Trajetória do observador e o ângulo θ de cada pernada.	67
FIG.4.8	Polarização dos estimadores versus ângulo das pernadas (em graus) em uma trajetória com quatro pernadas.	68
FIG.4.9	Polarização dos estimadores versus distância do VANT (em m).	68
FIG.4.10	Polarização dos estimadores versus velocidade (em m/s). (a) Alvo com posição inicial em $[50 500]$ (b) Alvo com posição inicial em $[50 600]$	69
FIG.4.11	Polarização dos estimadores versus número de marcações.	70
FIG.4.12	Polarização dos estimadores versus desvio padrão. (a) Polarização (b) Erro médio das N estimações.	71

LISTA DE TABELAS

TAB.3.1	EMQ azimutal para diferentes técnicas de melhoramento de sinal (MS) e de estimação de DoA	49
TAB.3.2	Erro de localização $\ \mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}\ $ médio (com dez medidas) versus a distância	49
TAB.3.3	Erro de localização (distância média de 190 metros)	49
TAB.3.4	Número de sinais de tiro coletados para cada distância entre observador-atirador (em metros)	51
TAB.3.5	Erro de estimações de localização e DoA (120 sinais de tiro) com ES(4)	52
TAB.3.6	Erro de localização e DoA e respectivo número de pares n usado na busca exaustiva ES(n) (120 sinais de tiro)	53

RESUMO

Essa dissertação apresenta algoritmos capazes de estimar parâmetros de um alvo através de sensoriamento passivo utilizando técnicas de análise de movimento de alvos. Esses alvos podem ser fixos (velocidade nula) ou em movimento, com velocidade constante ou com aceleração constante. Inicialmente, técnicas de estimação de alvos fixos são exploradas para obter a localização de um atirador fixo em um plano cartesiano usando um arranjo de microfones em movimento. Para isso um arranjo de microfones é embutido em um veículo aéreo não tripulado (VANT) remotamente pilotado do tipo quadricóptero para explorar os benefícios providos pela intrínseca mobilidade dos VANTs. Sinais de tiro são simulados de acordo com a geometria de um arranjo e corrompidos pelo ruído causado pelas hélices do VANT. Algoritmos que empregam a Correlação Cruzada Generalizada são utilizados para estimar a DoA. Esses algoritmos são comparados em termos de estimação de DoA de sinais acústicos impulsivos. Finalmente, as técnicas de análise de movimento de alvos são utilizadas para estimar a localização do atirador através de DoAs ruidosas. Resultados experimentais são discutidos para avaliar a utilização do método em situações reais. Na segunda parte do trabalho as técnicas de análise de movimento de alvo com velocidade constante (não-nula) e aceleração constante são utilizadas para a estimação de parâmetros de um alvo (posição, velocidade e aceleração). Nesse caso, o observador pode ser um veículo aéreo não tripulado de asa fixa, por exemplo, capaz de obter marcações através de sensoriamento passivo. Portanto, são discutidas nesse trabalho as especificações que esse VANT deve possuir para ser capaz de prover estimações razoáveis. As especificações estudadas são velocidade, número de marcações, trajetória do observador e acurácia das estimações do sensor passivo.

ABSTRACT

This thesis presents algorithms capable of estimating parameters of a target through passive sensing utilizing techniques of target motion analysis. The target can be fixed (null velocity) or in movement, with constant velocity or constant acceleration. Initially, techniques that estimate the position of a fixed target are exploited to obtain the location of a fixed shooter in a cartesian plane using a microphone array in movement. A single array is embedded in an UAV quadcopter to explore benefits provided by UAV intrinsic mobility. Gunshot signals are simulated according to the array geometry and buried in noise caused by propellers of the UAV. Algorithms based on generalized cross correlation are used to estimate DoA and are compared in terms of DoA estimation of impulsive sound waves. Finally, bearings-only target motion analysis techniques are used to estimate shooter localization through noisy DoAs. Experimental results are discussed to assess the feasibility of employing this method in real life situations. In the second part of the work, target motion analysis techniques using constant-velocity model and constant-acceleration model are utilized to estimate target parameters (position, velocity, and acceleration). In this case the observer can be a fixed wing unmanned aerial vehicle, for instance, capable of obtaining bearings from passive sensors. Thus, the specifications that an UAV must have to be capable of providing reasonable estimations are discussed in this work . The specifications studied herein are velocity, number of bearings, trajectory of the observer and the accuracy of the estimations of the passive sensor.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia Azul, área compreendida pela extensão do mar territorial brasileiro somada à zona econômica exclusiva (200 milhas) e à extensão da plataforma continental, é uma zona com grande quantidade de recursos minerais (CORRÊA, 2010). A demarcação desse território é realizado pela presença da Marinha do Brasil, pois os limites marítimos são linhas imaginárias. O patrulhamento e o controle do tráfego marítimo realizado pela Marinha são as tarefas que delimitam o espaço marítimo brasileiro. A Amazônia Azul é rica em petróleo, o que faz com que os cuidados com esse território sejam ainda maiores. Se a vigilância não for contínua e permanente, diversos tipos de ilícitos podem ocorrer, como pirataria, contrabando e exploração de recursos naturais. As ações de vigilância que são realizadas pela Marinha têm como objetivo realizar o controle de áreas marítimas, estabelecer uma postura pró-ativa na defesa de plataformas petrolíferas e permanecer em prontidão para responder às ameaças em vias marítimas (SZENDRODI, 2008).

A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) pode aumentar significativamente a área a ser vigiada com menor custo e sem risco a seus operadores. Um exemplo de uma possível utilização de VANTs é a recente pesquisa da Marinha estadunidense que advoga a utilização de pequenas embarcações que serviriam de base para que VANTs decolassem e retornassem das missões de reconhecimento (DARPA-NAVY, 2014). Essa é uma solução de vigilância por meio de sistemas aéreos não tripulados com grande autonomia e longo alcance que pode vir a ser implementada em um futuro próximo. Essa é a ideia principal do programa tático de reconhecimento desenvolvido entre a Marinha dos Estados Unidos e a Agência de Projetos Avançados de Pesquisa em Defesa (DARPA, do inglês *Defense Advanced Research Projects Agency*). Além disso, para que a área sob vigilância estratégica seja a maior possível, deve-se empregar o maior número possível de sensores no VANTs, como por exemplo câmeras, microfones, antenas de rádio-frequência e infra-vermelho. Com o emprego desses sensores é possível detectar, classificar e também estimar marcações através do processamento dos sinais obtidos de outras embarcações ou outros veículos aéreos que nesse trabalho serão chamados de alvos (STACY, 2002).

Os VANTs têm sido associados a aplicações militares por não colocar em risco vidas humanas devido à sua operabilidade. Inúmeras pesquisas sobre esses meios são em grande

parte dependentes de imagens capturadas por câmeras para monitorar o ambiente. Esses sinais permitem que pesquisadores possam calcular um caminho possível para navegação ou uma trajetória para uma formação autônoma de vôo (ALVAREZ, 2016; MAO, 2016). Uma recente atividade da DARPA sobre enxames de VANTs incluiu as três forças armadas para testar quais táticas defensivas e ofensivas para os enxames se sairia melhor em uma batalha com VANTs de asa fixa e quadricópteros (DARPA-NAVY, 2017).

Os quadricópteros têm sido amplamente utilizados devido às suas características, como decolagem vertical, estabilização, e disponibilidade de sinais da sua unidade de gerenciamento inercial (SCHRAM, 2014). VANTs também desempenham um papel importantíssimo em aplicações de mapeamento (SAMAD, 2013). De fato, eles podem ser utilizados em uma miríade de ambientes, não apenas devido à sua intrínseca mobilidade e baixo custo, mas também pela vantagem de não apresentar risco aos seus operadores. Essa especial e importante característica é fundamental em missões de busca e resgate em áreas de difícil acesso ou missões que requerem uma rápida busca em áreas extensas (OKUTANI, 2012; QI, 2015). Há ainda casos em que a presença humana é praticamente impossível como ambientes contaminados com gases tóxicos ou elevados níveis de radiação.

Nenhum trabalho apresentado até agora propõe um método para processar sinais de marcações (direções do alvo) obtidas por um VANT para estimar parâmetros de um alvo em um cenário tático naval e que considera que os resultados podem ser otimizados se utilizado o modelo apropriado para alvos fixos, alvos com velocidade constante e alvos com aceleração constante. Por exemplo, um veículo aéreo não tripulado, ao capturar sinais de disparos de arma de fogo utilizando um arranjo de microfones embarcado em um quadricóptero, poderia utilizar esses sinais para estimar a DoA de um atirador. Como um atirador usualmente não se desloca efetuando disparos, esse cenário nos leva a considerar um alvo fixo. Portanto, um modelo que estimasse somente a localização pode nos levar a bons resultados devido ao número pequeno de marcações disponíveis em uma situação real. Nesse exemplo, contudo, um novo e grave problema surge ao embarcar um arranjo de microfones em um quadricóptero: o ruído causado por suas hélices que corrompe as assinaturas acústicas produzidas por armas de fogo (FERNANDES, 2015). O ruído ambiente também é um fator a se considerar já que o quadricóptero estará mais exposto à rajadas de vento, contudo o ruído provocado pelo vento não é constante como o ruído gerado pelo quadricóptero.

Essa dissertação aborda a utilização de técnicas de análise de movimento de alvos

(*Target Motion Analysis*, TMA) para alvos fixos e alvos móveis. A aplicação de TMA para alvos fixos contribuirá como uma nova forma de se estimar a localização de um atirador ao processar somente algumas poucas assinaturas acústicas produzidas por uma arma de fogo. Já a aplicação de TMA para alvos móveis terá suas contribuições voltadas às especificações que um VANT precisa ter para que o seu desempenho na estimação de parâmetros de um alvo seja razoável em um cenário tático naval.

Portanto, inicialmente as técnicas de TMA para alvos fixos serão estudadas para o problema de localização do atirador. Um cenário possível seria a estimação da localização de um adversário assimétrico no mar (adversário que dispõe de pouca força militar e emprega métodos de combate não ortodoxos), ou a utilização de um VANT para localizar atiradores em terra, em operações mar-terra ou em um ambiente urbano.

Após os estudos das técnicas de TMA para alvos fixos, técnicas de TMA para alvos em velocidade constante e técnicas voltadas para alvos com aceleração constante serão analisadas em um cenário tático naval.

1.1 O PROBLEMA DA LOCALIZAÇÃO DO ATIRADOR

Nesta seção, serão explicados conceitos sobre o problema da localização de atiradores e sobre as assinaturas acústicas produzidas por um tiro. Serão apresentados também o estado da arte da pesquisa referente a sistemas de estimação de localização do atirador bem como as pesquisas disponíveis sobre o processamento de sinais de áudio coletados por um VANT.

1.1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Os veículos aéreos não tripulados e os sistemas de estimação da localização de atiradores são, atualmente, assuntos de grande interesse e têm sido utilizados com sucesso em diferentes aplicações, desde defesa nacional e forças de pacificação, até vigilância e garantia da lei e da ordem (GLO). Por exemplo, sistemas de localização de atirador têm sido propostos por beneficiar populações ao reduzir a violência relacionada a armas de fogo (AGUILAR, 2015). Como sugerido em (HRABINA, 2015), esses sistemas também podem ser utilizados para proteger animais em perigo devido a caçadores. Por sua vez, VANTs oferecem grande flexibilidade em missões de busca e resgate devido à sua habilidade em cobrir grandes áreas de forma rápida e eficiente (DOHERTY, 2007; OKUTANI, 2012).

A acústica tem sido utilizada com sucesso para estimar a direção de chegada (*direction of arrival*, DoA) e localização do atirador. Os dispositivos atualmente disponíveis são sistemas *stand alone*. Por exemplo, o sistema *Boomerang* e estruturas estacionárias compostas por um arranjo de microfones (MAZUREK, 2005; PAREDES CALDERON, 2015).

O ruído produzido pelo VANT pode reduzir significativamente o desempenho da estimação de DoA se comparado a arranjos que coletam áudio sem uma fonte ruidosa tão próxima. Isso pode reduzir drasticamente a distância máxima para a estimação de DoA de ondas acústicas. Em alguns casos, poderemos melhorar a estimativa de DoA empregando algoritmos projetados para oferecer robustez quanto ao ruído elevado; dois exemplos são o *Iterative Least Squares* (ILS) (FREIRE, 2014) e o algoritmo de busca exaustiva (ES, do inglês *Exhaustive Search*) (BORZINO, 2015b).

A localização do atirador é um tópico que tem atraído a atenção de muitos pesquisadores nas recentes décadas (LUO, 2016). Sistemas de localização do atirador podem ser úteis em inúmeras ocasiões, por exemplo: sistemas de vigilância, garantia da lei e da ordem e apoio a militares em missões onde atiradores podem ser uma grande ameaça. Os equipamentos utilizados para esse fim baseiam-se no processamento de assinaturas acústicas (*muzzle blast* e *shock wave*), ou eletromagnéticas (*muzzle flash*) geradas pelo ato de atirar com uma arma de fogo, ou ainda numa combinação de ambos (RAMOS, 2015). Ainda, sistemas acústicos de localização de caçadores, termo adotado pelo exército brasileiro para *snipers* (FREIRE, 2011), que estimam a localização de atiradores através da estimação de DoA desses componentes acústicos são particularmente atraentes devido às suas respostas rápidas, usualmente dentro de uma fração de segundo, bem como a possibilidade de serem usados em plataformas terrestres ou aéreas.

Um dos maiores desafios ao se projetar um sistema acústico de localização de atirador é o problema imposto pelo efeito de multipercurso/reverberação, que é particularmente importante se o dispositivo for utilizado em ambientes urbanos (RAMOS, 2013). Esse problema pode ser significativamente mitigado se o sensoriamento aéreo for utilizado em vez de plataformas terrestres. Um exemplo disso pode ser visto em (REIFF, 2004), onde o arranjo de microfones é instalado em um balão. Embora eficiente em termos de mitigar o problema do multipercurso devido à possibilidade de visada direta do atirador, a solução baseada em balões não tem requisitos suficientes para operar em situações reais em termos de custo, mobilidade e eficiência (FERNANDES, 2017b). Devido a recentes avanços na

tecnologia moderna, soluções baseadas em VANTs, como a proposta em (FERNANDES, 2016), têm se tornado uma opção possível e podem ser produzidas em larga escala com um custo relativamente baixo.

1.1.2 SINAIS ACÚSTICOS DE TIROS

Sinais acústicos podem ter diversas origens. A onda sonora recebida em um dado ponto no espaço é usualmente o resultado das contribuições de muitas fontes diferentes nas redondezas desse ponto. Com certa frequência, entretanto, somente componentes específicos de um sinal acústico particular são de interesse e os componentes restantes são simplesmente interferências ou ruídos. Dependendo do caso, pode ser necessário que o componente chamado ruído seja removido para melhorar a qualidade do sinal de interesse.

Nesse trabalho os sinais de interesse são as duas principais componentes acústicas que podem ser produzidas por um disparo de arma de fogo: a *muzzle blast* e a *shock wave*. A *muzzle blast* é uma onda acústica relacionada à explosão no cano da arma. Essa onda propaga-se a partir do cano da arma (*muzzle*), em todas as direções, na velocidade do som. Portanto, estimar a DoA dessa componente, utilizando um arranjo estacionário, produz somente informação sobre a direção do atirador. A *shock wave* é uma onda acústica criada por projéteis supersônicos que provê informação sobre a trajetória do projétil.

1.2 O PROBLEMA DA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE TMA USANDO UM VANT

Nesta seção, conceitos sobre o problema da estimação de parâmetros de TMA (posição inicial, velocidade e aceleração) de alvos serão apresentados. O estado da arte da pesquisa referente a sistemas de estimação de parâmetros de TMA e pesquisas disponíveis sobre o processamento de marcações coletadas por um VANT em um cenário típico naval serão avaliados nessa seção. Nesse ambiente serão considerados VANTs que obtêm marcações estimadas por dispositivos de estimação de direção de alvos (*direction finding*).

A vigilância da extensa área denominada Amazônia Azul é uma atividade que exige muitos recursos; logo, meios que possam ser empregados para cobrir essa área e que não sejam muito caros são desejáveis. O emprego de sensoriamento através de VANTs pode ajudar a resolver esse problema. As direções de chegada obtidas com esses VANTs podem ser processadas para estimar a posição inicial, velocidade e aceleração do alvo.

Os sinais de interesse, nesse caso, devem poder produzir um número elevado de marcações. Portanto, ao avaliar os algoritmos de estimação de parâmetros de TMA de um alvo em movimento os sinais de interesse a serem analisados dificilmente poderiam ser sinais de tiro, já que a estimação desses novos parâmetros requerem um número abundante de marcações no decorrer da trajetória do alvo. Portanto, para esse cenário serão considerados VANTs que utilizam dispositivos comercialmente disponíveis que realizam a estimacões de marcações (baseados em emissões eletromagnéticas) e o trabalho será pautado no processamento das marcações obtidas para realizar a estimação dos parâmetros de TMA.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal da presente dissertação é estimar parâmetros de TMA (posição inicial, velocidade e aceleração) de um alvo utilizando (somente) marcações obtidas com a utilização de um VANT remotamente pilotado. Dependendo do sinal disponível para estimar as direções de chegada a disponibilidade de marcações pode ser muito pequena, nesses casos as técnicas de TMA poderiam ser utilizadas para estimar apenas o parâmetro posição do alvo, partindo do pressuposto que o alvo é estacionário. Se a quantidade de marcações disponíveis for maior, técnicas de estimação para alvos com velocidade constante poderiam ser empregadas. E para os casos em que a quantidade de marcações disponíveis seja muito grande, o modelo de estimação de parâmetros de TMA com aceleração constante seria apropriado (DOĞANÇAY, 2006).

Inicialmente o modelo de estimação que tem como pressuposto que o alvo é fixo será empregado para estimar a localização do alvo (um atirador). Essa parte do estudo será utilizada como estudo preliminar das técnicas de TMA e será composto por uma fase de simulações e uma fase experimental. Para esse caso particular, os sinais de interesse serão os sinais acústicos (*muzzle blasts*) captados por um arranjo de microfones instalado em um VANT. O arranjo de microfones é instalado em uma plataforma aérea em movimento para que se possa explorar novas possibilidades para realizar a estimação da localização. Com isso, novos problemas causados pelo ruído gerado pelas hélices do VANT serão analisados. É realizada uma análise para avaliar se é possível estimar a DoA e a localização do atirador utilizando sinais de tiro corrompidos pelo ruído do VANT, como também determinar o raio de efetividade e desempenho da estimação de DoA e da localização.

Quando um conjunto de tiros coletados por um VANT em diferentes posições está

disponível, a utilização de técnicas de análise de movimento de alvos (TMA) é possível; essa técnica será investigada nesse trabalho para realizar a estimação da localização de atiradores. Isso permitiria determinar a localização do atirador sem a presença da componente *shock wave* (FREIRE, 2011) ou um mapa digital (PAREDES CALDERON, 2015). Como parte da pesquisa, o desempenho de algoritmos de melhoramento desses sinais corrompidos pelo ruído do VANT foi investigado e resultados referentes ao melhoramento de sinais de tiros sintetizados e reais, corrompidos pelo ruído do VANT, são apresentados.

Para alcançar o objetivo de estimação de localização de um alvo fixo, dois importantes aspectos do arranjo de microfones instalado em um VANT terão que ser levados em consideração:

- Os sinais acústicos coletados por um VANT são altamente ruidosos devido ao ruído gerado pelas hélices e à interferência eletromagnética; e
- Como consequência, as direções de chegada estimadas através de sinais captados por VANTs são fortemente ruidosas.

Para realizar a estimação de parâmetros de um alvo em movimento o número de marcações deve ser grande. Portanto, para a análise de parâmetros de um alvo em movimento o sinal de interesse dificilmente será um conjunto de *muzzle blasts* devido às poucas marcações que poderiam ser estimadas e às restrições de observabilidade do alvo. Os sinais de interesse utilizados para obter as marcações poderiam ser sinais de radiofrequência (RF) e, obviamente, deveríamos ter um dispositivo para estimar a direção dos alvos embarcado no VANT em vez de um arranjo de microfones.

A presente dissertação tem como objetivo avaliar técnicas típicas da área de Sistemas Táticos e de Armas. Para isso serão investigadas técnicas utilizadas em sensores passivos, típicos de Guerra Eletrônica. Essas técnicas serão empregadas no processamento dos sinais coletados pelo VANT para que novas possibilidades de sensoriamento para VANTs possam ser empregadas. Para isso, os seguintes objetivos parciais devem ser devidamente atingidos:

Objetivo 1. Avaliar se técnicas de Melhoramento do Sinal de áudio captado por VANTs poderiam ser empregadas para melhorar o desempenho da estimação de DoA e da localização do atirador. As técnicas investigadas são: a Filtragem Adaptativa, Subtração Espectral e Filtro de Mediana.

Objetivo 2. Estimar a direção de chegada a partir dos sinais de áudio coletados por um VANT. As técnicas abordadas são: Estimação Clássica, *Iterative Least Squares* e Busca Exaustiva.

Objetivo 3. Análise do movimento do alvo: estimar a localização da fonte emissora a partir das DoAs estimadas utilizando as seguintes técnicas de TMA: *Linear Least Squares* e *Total Least Squares*.

Objetivo 4. Propor o melhor método ou, em outras palavras, a melhor combinação de técnicas para realizar a estimação da localização de atiradores.

Objetivo 5. Comparar o desempenho dos métodos para estimação de parâmetros de TMA sobre o prisma dos critérios de observabilidade (trajetória) e do número de marcações disponíveis para avaliar a possibilidade de um VANT ser utilizado para estimar parâmetros de TMA (posição, velocidade e aceleração) quando o alvo está em movimento.

1.4 REVISÃO DE LITERATURA

Apesar da revisão de literatura estar espalhada ao longo de toda dissertação, nessa Seção estão as referências que mais se aproximaram dos objetivos dessa dissertação, de forma que é possível realizar uma comparação direta com esse estudo e apontar as contribuições dessa dissertação.

Em (FREIRE, 2011) é apresentado um método que utiliza as duas principais assinaturas acústicas para realizar a estimação da posição do observador. A *shock wave* é uma onda acústica criada por projéteis supersônicos que provê informação sobre a trajetória do projétil, ela pode ser utilizada, juntamente com a *muzzle blast* para realizar essa estimação. Outra abordagem para estimar a localização do atirador, para casos em que somente a *muzzle blast* (uma das assinaturas acústicas) está disponível, é utilizar uma plataforma elevada para capturar a onda acústica da arma e utilizar um mapa digital para estimar o ponto de interseção dos ângulos estimados (azimute e zenite) e a superfície terrestre (PAREDES CALDERON, 2015).

Em (PONDA, 2009), é proposto uma técnica de otimização de trajetória para a localização de alvos utilizando pequenos VANTs. A análise de movimento de alvos baseada somente em marcações (*Bearings-Only Target Motion Analysis*, BO-TMA) é utilizada para estimar a trajetória de um alvo. Essas marcações são calculadas com sinais de imagens coletados por uma câmera instalada no VANT.

Em (OKUTANI, 2012) foi proposto um arranjo de microfones instalado em um VANT

do tipo quadricóptero para capturar sinais de áudio para procurar por pessoas em perigo em situações de desastres.

Entre os diversos artigos que têm sido publicados recentemente, (YOON, 2015) advoga a utilização de filtros adaptativos para reduzir o ruído causado pelas hélices de VANTs. Nesse trabalho, quatro microfones foram instalados perto das hélices para capturar predominantemente o ruído. Esse ruído é utilizado como sinal de referência no filtro adaptativo.

Em (OKUTANI, 2012) é proposto um método para localização da fonte de sinais acústicos em ambientes externos. É utilizado um quadricóptero, com um arranjo de microfones para capturar a localização de sinais acústicos e um sensor de movimento comercial com dispositivo de reconhecimento de gestos (Kinect), utilizado para obter a posição em três dimensões e a orientação do quadricóptero. Três questões relacionadas à detecção e à localização da fonte sonora em ambientes externos são levantadas. A primeira é o nível de ruído dos interferidores, como ruído do próprio VANT e ruído causado pelo vento. A segunda é que sinais de áudio têm uma vasta, variada e extensa largura de banda; e a terceira se refere ao fato de que o arranjo de microfones está se movendo de acordo com os movimentos do quadricóptero. Nesse trabalho, o algoritmo proposto é baseado no *Multiple Signal Classification (MUSIC) using Standard Eigenvalue Decomposition* (SCHMIDT, 1986). A solução proposta tenta lidar com as três questões. Os algoritmos são comparados em três aspectos: avaliação qualitativa dos espectrogramas, avaliação quantitativa dos resultados da localização das fontes sonoras e avaliação quantitativa da supressão de ruído.

Em (SUOJANEN, 2015) é realizada uma avaliação da utilização de VANTs e satélites sujeita a três capacidades militares: proteção, percepção e compromisso em uma perspectiva de 10 anos. Cada capacidade é avaliada em diferentes missões com diferentes características. Esse trabalho indica que VANTs são utilizados no nível tático e que nesse período sofrerá diversas melhorias em suas funcionalidades. Em outras palavras, estima-se que serão incluídas armas a laser e que o tamanho dos VANTs será ainda mais variado e com baixo custo. Dessa forma, poderá proporcionar grandes benefícios aos seus usuários. Esse artigo revela como o papel dos VANTs é promissor em médio prazo e que sua significância tende a aumentar com o tempo devido aos avanços nessa área. Essa tendência pode ser explicada devido à visão dos militares de que VANTs são encarados como uma ferramenta tática de alta importância. Além disso, o artigo advoga que tal planejamento promove o desenvolvimento de capacidades para situações imprevisíveis, ou seja, as pes-

quisas com VANTs tendem a ter cada vez mais utilidade em situações reais devido ao contínuo aparecimento de novas ameaças.

Como pôde ser percebido nenhum desses trabalhos utiliza sinais de áudio coletados por um VANT para obter marcações e com essas marcações realizar a estimação de um alvo fixo. Não foi encontrado também um trabalho que avalia diferentes características do VANT que possibilitam melhores estimativas, como a velocidade do VANT por exemplo.

1.5 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

A principal contribuição dessa dissertação é a análise de algoritmos de TMA para aplicação em um ambiente tático naval. Em adição, outra contribuição relevante é a obtenção de um método que permita estimar a localização de um atirador fixo usando somente *muzzle blasts* coletadas por um VANT em movimento empregando técnicas de TMA.

Resultados parciais produzidos por esta dissertação foram publicados em diversas conferências. Abaixo estão listadas as contribuições dessa dissertação com os respectivos locais de publicação:

- Estimação de uma curva de SNR própria para sinais de tiro que seriam coletados por um VANT. Essa curva é utilizada em ambientes simulados para gerar sinais sintetizados com uma SNR apropriada, nesse ambiente é possível facilmente analisar o desempenho das estimativas para diferentes distâncias, mudar a geometria do arranjo e trajetória do VANT. Avaliação de métodos de melhoramento de sinal, estimação de DoA e de localização do atirador \Rightarrow Artigo publicado no SBrT 2016.
- Validação do método proposto em um ambiente simulado através de testes com sinais de tiro reais gravados no CAEx (Centro de Avaliações do Exército, Restinga da Marambaia, Rio de Janeiro) \Rightarrow Artigo publicado no LASCAS 2017.
- Avaliação de como a estabilização de atitude do arranjo embarcado no VANT pode impactar nos resultados de estimação de DoA, ou seja, o arranjo pode sofrer instabilidade em relação a uma determinada referência relacionados com a inclinação em relação aos eixos x e y , e rotação em torno do eixo z . Avaliação de desempenho de um arranjo de microfones coplanares \Rightarrow Artigo publicado no SPIE 2017.
- Finalmente, será submetido em breve um artigo para um periódico no qual serão abordados de maneira mais abrangente as técnicas de TMA para os diversos cenários.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado da seguinte forma: após esta breve introdução, é realizada no Capítulo 2 uma revisão de literatura sobre as técnicas utilizadas nessa dissertação. No Capítulo 3 é explicado como o método é utilizado, como os sinais foram sintetizados para simular a coleta de sinais por um VANT em uma dada trajetória e como foram coletados os sinais em campo; são apresentados os resultados das simulações e dos testes experimentais. No Capítulo 4 os algoritmos de TMA são analisados e são apresentados resultados de simulações para diferentes trajetórias do observador e alvo e desempenho para diferentes número de marcações disponíveis. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 ARCABOUÇO CONCEITUAL

Nesse capítulo serão introduzidas as técnicas que serão utilizadas na dissertação. Para realizar a análise de alvos fixos serão estudadas as técnicas de BO-TMA, *linear least squares* e *total least squares*. Como para analisar essas duas técnicas foi concebido um cenário em que um VANT utiliza a acústica para estimar marcações de um atirador e como não há equipamentos disponíveis comercialmente que realizam essas estimações, as técnicas de estimação de direção de chegada e melhoramento do sinal de interesse serão avaliadas para verificar a possibilidade de um VANT realizar essa atividade. As técnicas de estimação de DoA são: correlação cruzada generalizada e os algoritmos de busca exaustiva e *Iterative Least Squares*. As técnicas para o melhoramento do sinal estudados são a filtragem adaptativa, a subtração espectral e o filtro de mediana. Já para a análise de alvos em movimento serão introduzidos o estimador pseudolinear, o estimador pseudolinear com compensação de polarização e o estimador com variáveis instrumentais.

2.1 MELHORAMENTO DE SINAIS

Pesquisas relacionadas com o projeto e controle de VANTs são tópicos que estão sofrendo rápido crescimento nos últimos anos devido à sua enorme variedade de aplicações possíveis. Uma dificuldade inerente associada à captura de sinais de áudio utilizando microfones em VANTs está relacionada com a interferência do ruído causado pelas hélices. Portanto, métodos para cancelar o ruído interferidor são desejáveis e a implementação de tais mecanismos são cruciais, especialmente em casos onde a qualidade dos sinais de áudio é uma questão sensível. O Melhoramento Adaptativo de Sinal (*Adaptive Signal Enhancement*, ASE) é uma técnica bem conhecida que utiliza um filtro adaptativo para recuperar o sinal de interesse de um sinal ruidoso. Um único microfone ou múltiplos microfones podem ser utilizados para adquirir amostras do ruído. Uma melhoria para eliminar o ruído e conseqüentemente conseguir um sinal de qualidade é obtido ao utilizar um sistema multi-microfones; isso ocorre porque com arranjo de microfones é possível realizar uma filtragem espacial ao fundir informações do tempo-espaço (YOUSHENG, 2014).

A melhoria desses sinais pode ser obtida através de mecanismos de cancelamento de ruído que podem ser implementados diretamente no *hardware* ou ser implementado através

de um *software*. Conformação de feixe ou *beamforming* (TREES, 2004), subtração espectral (BEROUTI, 1979), filtro de mediana (FITZGERALD, 2010; GALLAGHER JR, 1981) e filtragem adaptativa (DINIZ, 1997; SAYED, 2003) são exemplos de métodos bem conhecidos para a supressão de ruídos que têm apresentado bons resultados para diferentes situações. Uma das principais características da técnica de conformação de feixe é a sua bem conhecida capacidade de filtragem espacial que lida muito bem com ruídos espacialmente distribuídos (TREES, 2004). O método de subtração espectral ganhou alguma popularidade, especialmente em aplicações de melhoria de sinais de fala, e suas propriedades e aplicações têm sido amplamente discutidas e analisadas (EVANS, 2006; MEYER, 1997; MIZUMACHI, 1998; TOSANGUAN, 2008). A utilização do filtro de mediana proposta recentemente para o pré-processamento de sinais de tiros demonstrou ser uma ótima alternativa para o reconhecimento de sinais impulsivos (BORZINO, 2015a). A filtragem adaptativa tem flexibilidade e demonstra ser apropriada para aplicações em tempo real. Soluções híbridas baseadas em cascatas de conformação de feixe e filtragem adaptativa também têm sido reportadas por prover resultados promissores (WU, 2013).

2.1.1 FILTRAGEM ADAPTATIVA

Como um dos objetivos dessa dissertação é estimar a DoA de sinais ruidosos, é natural considerar esquemas de melhoramento do sinal de interesse como um meio de melhorar as estimações. Note que todos os algoritmos mencionados anteriormente têm mostrado bons resultados quando a razão sinal ruído (SNR, do inglês *signal to noise ratio*) é baixa devido à grande distância entre o atirador e o arranjo de microfones, i.e., os sinais estão altamente corrompidos por ruído de observação.

Recentemente, para o caso de aquisição de sinais a partir de um drone, o uso da filtragem adaptativa se mostrou como uma boa técnica para cancelar o ruído causado pelas hélices. Fernandes et. al. (FERNANDES, 2015) advoga a utilização dos sensores piezoelétricos para capturar sinais correlacionados somente com o ruído causado pelas hélices. Isso permite o uso desses sinais como entrada de um filtro adaptativo. Fernandes et. al. utilizou um VANT pequeno e de baixo custo com apenas uma hélice rodando. Esse trabalho foi um estudo preliminar para avaliar as possibilidades de uso desse sensor para a melhoria do sinal.

Contudo, na presente dissertação, o VANT utilizado é do tipo quadricóptero e está operante, tendo portanto, quatro hélices em funcionamento. Esse fato torna o problema

da filtragem adaptativa mais complexo. Além disso, existe um grande número de sistemas embutidos que produzem uma grande interferência eletromagnética. Também, possivelmente os sinais capturados por esses sensores apresentam algumas não-linearidades. Todos esses fatores fazem com que o sinal capturado pelo sensor piezoelétrico não apenas possa ter uma baixa correlação com o ruído capturado pelo microfone como também apresentar componentes de frequência que não estão presentes nos sinais dos microfones.

No trabalho proposto por Fernandes et. al. (FERNANDES, 2015) foi calculada a *Magnitude Squared Coherence* (MSC) utilizando o método proposto em (WELCH, 1967); verificou-se nesse trabalho que o valor mínimo para essa métrica foi de 0,60 (em uma escala de 0, para sinais descorrelacionados, até 1, totalmente correlacionados) enquanto que os sinais capturados por um quadricóptero (Parrot AR Drone 2.0 que será utilizado para coletar sinais de tiro em campo) tiveram um valor de 0,25 (em média). Isso evidencia que o esquema de melhoramento de sinal através da filtragem adaptativa necessita de procedimentos adicionais para funcionar de forma apropriada em um VANT que tenha mais de uma hélice; portanto, esse esquema não será utilizado nesse trabalho.

2.1.2 SUBTRAÇÃO ESPECTRAL

A subtração espectral é uma outra abordagem para o melhoramento do sinal. Essa técnica necessita de informação sobre o ruído para estimar seu espectro. Ao subtrair o espectro do ruído do sinal original é gerado um sinal melhorado. A estimação da DoA de sinais de disparos de arma de fogo em ambientes altamente ruidosos pode ser realizada utilizando esse método (BORZINO, 2014). Nesse trabalho pode-se notar que o pré-processamento se faz necessário para diminuir o ruído de observação e assim melhorar a estimação da DoA.

O esquema da subtração espectral será descrito abaixo. Considere que a transformada de Fourier dos sinais ruidosos que são coletados pelos microfones seja $X(e^{jw})$, do sinal limpo seja $S(e^{jw})$ e do ruído aditivo seja $R(e^{jw})$. A estimação do espectro do sinal limpo, $\hat{S}(e^{jw})$, pode ser obtida por (BORZINO, 2015a)

$$\hat{S}(e^{jw}) = [|X(e^{jw})| - \bar{R}(e^{jw})] e^{j\angle X(e^{jw})}, \quad (2.1)$$

onde $\bar{R}(e^{jw})$ é a média do valor absoluto de $R(e^{jw})$ estimado do período de em que há somente o ruído aditivo. A Equação (2.1) pode ser escrita da seguinte forma

$$\hat{S}(e^{j\omega}) = \left[1 - \alpha \frac{\bar{R}(e^{j\omega})}{|X(e^{j\omega})|} \right] X(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega})X(e^{j\omega}), \quad (2.2)$$

onde $H(e^{j\omega})$ é o filtro da subtração espectral. Quando $H(e^{j\omega}) < 0$ na Equação (2.2), forçamos $H(e^{j\omega})$ ser igual a zero. O parâmetro α regula as componentes frequenciais que são ajustadas para valor zero. Em (BORZINO, 2015a) foi notado que para sinais de tiro o valor de α variando entre cinco e dez gera bons resultados para o melhoramento de sinais acústicos de tiro. Se o sinal estiver muito corrompido e for necessário um valor α maior, poderá haver alta distorção dos picos dos sinais de tiro fazendo com que não haja nenhuma melhoria na estimação de DoA a partir desses sinais coletados por um arranjo de microfones.

2.1.3 FILTRO DE MEDIANA

Borzino (BORZINO, 2015a) propôs a utilização do filtro de mediana para melhorar sinais de tiro. O filtro de mediana tem sido utilizado para melhorar a parte harmônica da música ao remover sinais impulsivos indesejados. Esse filtro pode ser facilmente modificado para melhorar sinais impulsivos ao subtrair a parte harmônica do sinal (a saída do filtro de mediana) do sinal original. Como resultado, para sinais de tiro, somente as componentes acústicas dos sinais de tiro (*muzzle blast* e *shock wave*) restariam após o processo de filtragem.

O filtro de mediana simplesmente substitui cada amostra de uma sequência $x[n]$ pela sua mediana numa dada janela ao redor de “si”. A mediana é calculada através do ordenamento de um conjunto de amostras, esse conjunto é obtido ao realizar um janelamento entre a amostra e $\pm\Delta$ amostras. O valor do que separa a metade menor e a metade maior substitui o valor da amostra. Com uma escolha adequada do parâmetro Δ é possível conseguir um bom esquema para eliminar os sinais impulsivos de determinado sinal. Como o objetivo da aplicação do filtro de mediana nesse trabalho é melhorar os sinais de tiro, impulsivos por natureza, será necessário processamento adicional. Se o sinal de tiro a ser melhorado é modelado como $x[n] = s[n] + r[n]$, onde $s[n]$ é o sinal de tiro limpo e $r[n]$ é o ruído aditivo, então após o processo de filtragem do sinal $x[n]$, é obtido uma estimativa $\hat{r}[n]$. O sinal impulsivo então pode ser facilmente obtido como $\hat{s}[n] = x[n] - \hat{r}[n]$. O autor que propôs inicialmente essa técnica para melhoramento de sinais de tiro (BORZINO, 2015a) alega que bons resultados foram obtidos com o parâmetro $\Delta = 100$ para sinais

captados a uma taxa de amostragem $f_s = 96$ kHz e também alerta para a utilização de *buffers* para tratar o problema da não causalidade inerente a um filtro de mediana.

2.2 ESTIMAÇÃO DE DIREÇÃO DE CHEGADA

Os métodos para estimação da direção de chegada existentes na literatura fazem uso, principalmente, de três medidas físicas diferentes: Diferença de Fase, Energia do Sinal Recebido, Diferença de Tempo de Chegada.

Ao explorar as medidas de diferença de fase do sinal recebido em cada sensor pode-se estimar a Direção de Chegada (*Direction of Arrival*, DoA). Esse método é aplicável quando a fonte emite sinais acústicos de banda estreita. Outro método possível é conseguido ao medir a energia do sinal recebido em cada sensor. Com essas medidas pode-se estimar a localização da fonte emissora. Esse método é possível pois a intensidade, ou energia do sinal acústico é atenuado em função da distância da fonte emissora. Finalmente, ao explorar a Diferença de Tempo de Chegada (*Time Difference of Arrival*, TDoA), é possível estimar a direção de chegada de sinais acústicos banda larga. Essas medidas foram largamente investigadas para estimar a localização de fontes sonoras. Esse método requer medidas precisas do atraso entre os sensores (SHENG, 2005).

Portanto, sinais de áudio impulsivos e de banda-larga, em geral, requerem algoritmos especializados para o seu processamento, ou seja, métodos de determinação de DoA baseados na TDoA. Para calcular a TDoA entre dois microfones, frequentemente, é utilizado o método da Correlação Cruzada Generalizada (*Generalized Cross-Correlation*, GCC) (KNAPP, 1976).

O GCC pode ser utilizado para sinais de tiro, um sinal banda larga por natureza. O método GCC usa a TDoA entre sinais que chegam até pares de microfones para estimar a DoA. TDoA pode ser estimada através do pico da correlação cruzada entre sinais. O GCC-PHAT (*phase transform*) é uma subclasse do método GCC que será utilizado nesse trabalho devido ao seu desempenho para estimar a TDoA de sinais de tiro (FREIRE, 2012).

2.2.1 SOLUÇÃO DE ESTIMAÇÃO 3D

A solução clássica para estimação 3D para arranjos espaciais depende de informação sobre a geometria do arranjo de microfones e o TDoA da *muzzle blast* entre pares de microfones.

O primeiro dado a ser calculado refere-se à geometria do arranjo e é descrito por:

$$\Delta \mathbf{p}_{ij} = \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j}{v_{sound}}, \quad (2.3)$$

onde \mathbf{p}_i e \mathbf{p}_j são as coordenadas dos microfones $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ e v_{sound} é a velocidade do som.

A defasagem em número de amostras, τ_{ij} , é estimada usando a correlação cruzada entre sinais coletados por um par de microfones (\mathbf{p}_i e \mathbf{p}_j). A correlação cruzada é definida como r_{x_i, x_j} e a diferença de tempo de chegada pode ser estimada por

$$\tau_{ij} = \arg \max r_{x_i, x_j}(\tau), \quad (2.4)$$

onde o tempo de defasagem em segundos entre os microfones i e j é dado por $\hat{\tau}_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{f_s}$.

A TDoA para os microfones i e j poderia ser computada como $\Delta \mathbf{p}_{i,j}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi}$ se o vetor unitário $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$ na direção de chegada da propagação da onda fosse conhecido,

$$\mathbf{a}_{\theta, \phi} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\theta \cos \phi \\ -\text{sen}\theta \sin \phi \\ -\cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

onde θ é o ângulo zenital e ϕ é o azimute.

A estimação de $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$ é realizada através da minimização de uma função custo quadrática que, para um arranjo de N microfones, pode ser expressa como

$$\xi(\theta, \phi) = (\hat{\tau}_{12} - \Delta \mathbf{p}_{12}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi})^2 + (\hat{\tau}_{13} - \Delta \mathbf{p}_{13}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi})^2 + \dots + (\hat{\tau}_{(N-1)N} - \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N}^T \mathbf{a}_{\theta, \phi})^2. \quad (2.6)$$

Fazendo o gradiente da função custo na Equação (2.6), com respeito a $\mathbf{a}_{\theta, \phi}$, igual a zero, obtém-se

$$\mathbf{a}_{DoA} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p}, \quad (2.7)$$

onde \mathbf{R} é uma matriz 3×3 é dada por

$$\mathbf{R} = \Delta \mathbf{p}_{12} \Delta \mathbf{p}_{12}^T + \Delta \mathbf{p}_{13} \Delta \mathbf{p}_{13}^T + \dots + \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N} \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N}^T, \quad (2.8)$$

e \mathbf{p} é um vetor 3×1 dado por

$$\mathbf{p} = \hat{\tau}_{12} \Delta \mathbf{p}_{12} + \hat{\tau}_{13} \Delta \mathbf{p}_{13} + \dots + \hat{\tau}_{(N-1)N} \Delta \mathbf{p}_{(N-1)N}. \quad (2.9)$$

Possivelmente, alguns sinais coletados pelos microfones que compõem o arranjo podem degradar a acurácia da estimação da direção de chegada. Isso acontece devido a sinais espúrios que não contribuem para a minimização da função custo na Equação (2.6). A estimativa de TDoA $\hat{\tau}_{ij}$, se obtida a partir de um sinal altamente corrompido por ruído, pode alterar a estimativa de DoA. Portanto, diferentes técnicas que objetivam melhorar a estimação da direção de chegada foram propostas, incluindo algoritmos como o ILS (FREIRE, 2014) e o ES (BORZINO, 2015b). Eles selecionam um dado número de pares de microfones com base em uma função custo de mínimos quadrados, em uma tentativa de minimizar os efeitos nocivos de sinais espúrios que podem ser captados por alguns dos microfones do arranjo. O algoritmo ILS (*iterative least squares*) elimina os pares de microfones que menos contribuem para a minimização da função custo até que reste seis ou cinco pares (FREIRE, 2014). O algoritmo de busca exaustiva (ES, do inglês *Exhaustive Search*) foi proposta para avaliar todas as possíveis combinações de $n < N$ pares de microfones e escolher a que minimiza a função custo correspondente (BORZINO, 2015b). Essas técnicas, sobretudo a busca exaustiva, melhoram a acurácia da estimação de DoA consideravelmente, como pode ser visto em (FERNANDES, 2016).

Note que sempre que um arranjo planar for utilizado, todas as combinações de microfones sempre definirão um arranjo planar (todos os microfones têm a mesma coordenada z); logo, é possível inferir que a matriz \mathbf{R} sempre será uma matriz de posto 2 para arranjos planares. Essa matriz poderia ter posto unitário se três microfones fossem dispostos linearmente, geometria que deve ser evitada na montagem dos arranjos em um VANT. Podemos pois concluir que a fórmula clássica $\mathbf{a}_{DoA} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}$ não pode ser aplicada diretamente quando usarmos um arranjo planar. Contudo, se informações sobre o cenário em que um VANT está sobrevoando estiverem disponíveis *a priori*, por exemplo se o operador tiver conhecimento que o VANT está sobrevoando todos os possíveis atiradores, seria possível escolher entre os ângulos de elevação que sofreriam ambiguidade.

2.2.2 SOLUÇÃO DE ESTIMAÇÃO 2D

A solução de estimação de direção de chegada 2D que pode ser utilizada para arranjos espaciais e planares sem ambiguidade também depende de informação sobre as coordenadas dos microfones e o tempo de diferença de chegada da *muzzle blast* entre pares de microfones. Porém, nesse caso somente as coordenadas de $\mathbf{p} = [x, y]^T$ e um parâmetro (o

azimute θ) serão estimados. Portanto, será feita a estimação do vetor unitário \mathbf{a}_θ ,

$$\mathbf{a}_\theta = \begin{bmatrix} \text{sen}\theta \\ -\text{cos}\theta \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

A estimação de \mathbf{a}_θ é dada também por uma função de mínimos quadrados como descrito na Equação (2.6), que, ao ajustar o gradiente da função custo igual a zero com respeito a \mathbf{a}_θ , resulta na Equação (2.7). Nesse caso, para arranjos planares, a matriz \mathbf{R} é 2×2 . Como resultado, tanto para arranjos espaciais quanto para arranjos planares, a matriz \mathbf{R} será sempre inversível para todas as possíveis combinações.

2.3 ANÁLISE DE MOVIMENTO DE ALVOS

A análise do movimento de alvos (*Target Motion Analysis*, TMA) é a técnica utilizada para determinar diversos parâmetros de um alvo. O método utiliza as direções de chegada que são conseguidas com sensores como SONAR (CH, 2015) ou RADAR (RISTIC, 2002). O TMA é realizado ao comparar as direções conseguidas do alvo com a orientação dos sensores. Essas mudanças relativas são analisadas utilizando técnicas geométricas. Limites de movimentação do alvo são assumidos para os diversos casos analisados. Os parâmetros conseguidos ao aplicar essa análise podem ser: distância do alvo, curso, direção e velocidade. Finalmente, o TMA pode ser executado de forma automática ou manual.

O estudo do TMA possibilita a utilização da técnica em arranjos distribuídos geograficamente; nesse caso o alvo teria sua localização estimada com um conjunto de estimativas de DoA já que existem mais de dois arranjos espalhados que captariam o evento acústico em um mesmo instante.

Os métodos para estimação de parâmetros do TMA existentes na literatura fazem uso, principalmente, de quatro medidas físicas:

- Somente direções de chegada
- Efeito Doppler e direções de chegada
- Somente distâncias
- Energia e direções de chegada

O problema da análise do movimento de alvos baseado somente em direções (*Bearings-Only*, BO) tem sido uma área muito pesquisada há décadas. Nesse problema, a trajetória

do alvo é estimada com informações das direções do alvo. O alvo pode ser um navio, aeronave ou outra plataforma móvel e as direções são obtidas com o auxílio de um ou mais sensores. Essa técnica é chamada com certa frequência de BO-TMA. As questões de observabilidade e as equações não-lineares fazem com que essa técnica seja um problema desafiador (NARDONE, 1981; BADRIASL, 2014). O problema da não-linearidade implica que o observador deve realizar manobras para satisfazer a condição de observabilidade.

No BO-TMA a localização de um alvo fixo é realizada através da interseção das linhas traçadas conforme as direções conseguidas, partindo de diferentes posições do observador. Essa técnica é chamada triangularização. Na ausência de ruídos de observação as direções obtidas em diferentes posições produzem uma única interseção, se os critérios de observabilidade são seguidos pelo observador. Contudo, com a presença de ruído de observação, se faz necessária uma solução para triangularização, ou seja, existe a necessidade de técnicas estatísticas para o BO-TMA (DOĞANÇAY, 2005a). As ideias básicas para a localização de alvos utilizando a triangularização foram publicadas por Stansfield (STANSFIELD, 1947). Para alvos em movimento é possível estimar parâmetros adicionais como velocidade, aceleração e rumo do alvo utilizando o BO-TMA. Nesse caso, critérios de observabilidade, considerando um único observador, também devem ser seguidos para ser possível realizar essas estimações; nesse caso em particular o alvo se torna observável após o observador realizar uma manobra (GUPTA, 2015).

Como o movimento relativo entre o alvo e o observador é inerente ao TMA, se a fonte emissora emitir componentes harmônicos esse sinal sofrerá o efeito Doppler no observador. Portanto, a avaliação desse sinal no domínio da frequência pode ser bem explorada para melhorar os resultados das estimações. A utilização do efeito Doppler e dos ângulos de chegada para analisar o alvo é denominado *Doppler-Bearing* (DB) e a Análise de Trajetória de Alvo Baseada em *Doppler bearings* (DB-TMA) (HO, 2006).

O TMA quando utiliza somente as distâncias (*Range-Only*, RO) pode ser formulada como um problema de filtragem não-linear. O RO-TMA não atraiu muita atenção no campo de localização de alvos desde os seus primeiros trabalhos publicados. Isso se deve à inexistência de estruturas de filtros consistentes no campo do RO-TMA com um único observador (RISTIC, 2002).

Para sinais de radiofrequência, uma abordagem para o TMA é a utilização de medidas da energia e direção (*Power-Bearing*, PB) dos sinais, denominado PB-TMA. A energia do sinal contém implicitamente informação sobre a distância, complementando a informação

obtida com as direções. Portanto, medidas da energia do sinal e das direções facilitam as tarefas do TMA. A dificuldade do PB-TMA está na incerteza do grau de atenuação do caminho percorrido pelos sinais (GU, 2011).

2.3.1 TÉCNICAS PARA ALVOS FIXOS

Como a coleta de sinais acústicos de tiro permite que direções de chegada sejam estimadas e como o número de tiros coletados em uma situação real pode ser pequeno, o método utilizado será o BO-TMA para alvos fixos.

2.3.1.1 PRESSUPOSTOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE ALVOS FIXOS

Para o problema de localização de alvo em duas dimensões, é assumido nesse trabalho que o alvo (representado pelo vetor de coordenadas \mathbf{p}) é fixo (estacionário). Também é assumido que as posições de observação \mathbf{r}_k no exato instante em que um sinal de tiro é coletado são conhecidas, sendo N o número de tiros coletados e $k \in \{0, 1, \dots, N - 1\}$ os intervalos de tempo discretos.

Outros pressupostos estão descritos abaixo:

- Somente um conjunto de *muzzle blasts* está disponível nesse trabalho para estimar as marcações $\hat{\theta}_k$, i.e., o arranjo de microfones está fora do campo de visão da *shock wave* no caso de tiros supersônicos.
- A posição do observador não está sujeita a ruído, i.e., não existem erros nas coordenadas x e y das posições assumidas pelo observador.
- O alvo é observável, i.e., é possível estimar uma única posição do alvo com marcações isentas de ruído (NARDONE, 1981); por exemplo, o VANT não está voando em direção ao alvo.

A Figura 2.1 mostra uma geometria de TMA onde todos esses pressupostos são observados. O ângulo θ_k define a direção de chegada da frente de onda emitida pelo alvo em cada intervalo de tempo discreto.

2.3.1.2 MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES

Doğançay (DOĞANÇAY, 2005a) estabeleceu que ao assumir que o erro de estimação das DoAs sejam muito pequenos, ou seja, $\hat{\theta}_k - \theta_k \approx 0$, a solução chamada de mínimos

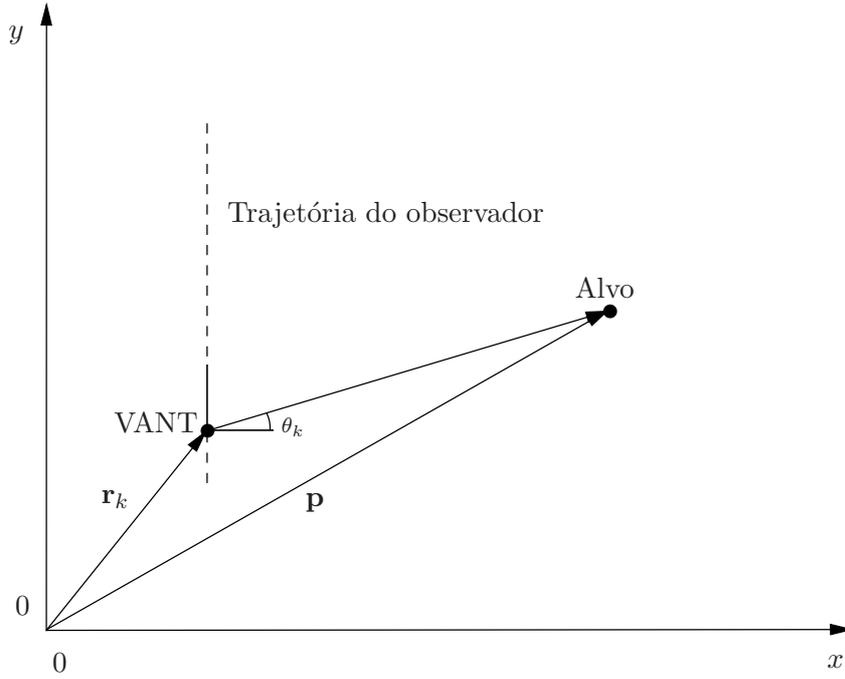


FIG. 2.1: Geometria de TMA considerada nesse trabalho para a parte de localização de alvo fixo.

quadrados lineares (*linear least-squares*, LS) pode ser definida como

$$\hat{\mathbf{p}}_{\text{LS}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{b}, \quad (2.11)$$

onde a matriz $N \times 2$ \mathbf{A} é definida como

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T \\ \mathbf{a}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{a}_N^T \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

com os vetores \mathbf{a}_k sendo dado por

$$\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} \sin \hat{\theta}_k \\ -\cos \hat{\theta}_k \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

enquanto o vetor $N \times 1$ \mathbf{b} e a matriz de ponderação diagonal $N \times N$ \mathbf{W} são definidos, respectivamente, como

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{a}_2^T \mathbf{r}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{a}_N^T \mathbf{r}_N \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

e

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} d_1^2 \sigma_{n_1}^2 & & & \mathbf{0} \\ & d_2^2 \sigma_{n_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & d_N^2 \sigma_{n_N}^2 \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

onde d_n é a distância entre o observador e o alvo e σ_n^2 é a variância do erro de estimação das DoAs.

2.3.1.3 MÍNIMOS QUADRADOS TOTAIS

A solução chamada de *total least squares* (TLS) é obtida ao adicionar pequenas perturbações à matriz \mathbf{A} e ao vetor \mathbf{b} de forma que a equação fique consistente. A solução dessa equação é o TLS e de acordo com Doğançay (DOĞANÇAY, 2005a), essa solução pode ser escrita como

$$\hat{\mathbf{P}}_{\text{TLS}} = \frac{1}{v_{33}} \begin{bmatrix} v_{13} \\ v_{23} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

onde v_{13}, v_{23}, v_{33} são os elementos na terceira coluna de \mathbf{V} , a matriz unitária obtida da decomposição em valores singulares da matriz aumentada $N \times 3$ $[\mathbf{A}, -\mathbf{b}]$.

A solução TLS normalmente produz menor polarização em relação à solução de mínimo quadrados lineares (DOĞANÇAY, 2005a).

2.3.2 TÉCNICAS PARA ALVOS EM MOVIMENTO

Quando é possível para um observador em movimento obter um número elevado de marcações de um alvo, métodos para estimar parâmetros de um alvo podem ser utilizados. Contudo, como para esse trabalho a estimação de parâmetros de TMA será realizada por apenas um observador, fazem-se necessários outros importantes pressupostos para que seja possível realizar as estimações.

2.3.2.1 PRESSUPOSTOS PARA A LOCALIZAÇÃO DE ALVOS EM MOVIMENTO

O alvo móvel nessa parte do trabalho será representado por seu vetor de coordenadas \mathbf{p}_k . O número de marcações utilizadas no problema de estimação de parâmetros será N . Essas marcações serão realizadas em instantes de tempo $t_k = kT/N, k = 0, 1, \dots, N - 1$, onde T é o intervalo de tempo em que são realizadas as medidas. A localização do alvo nos tempos t_k é dada por

$$\mathbf{p}_k = \mathbf{p}_0 + t_k \mathbf{v}_0 + \frac{t_k^2}{2} \mathbf{a} \quad (2.17)$$

$$= \mathbf{M}_k \boldsymbol{\xi} \quad (2.18)$$

onde o parâmetro posição inicial, vetor \mathbf{p}_0 , é definido por

$$\mathbf{p}_0 = \begin{bmatrix} p_{x,0} \\ p_{y,0} \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

o parâmetro velocidade inicial, vetor \mathbf{v}_0 , sendo

$$\mathbf{v}_0 = \begin{bmatrix} v_{x,0} \\ v_{y,0} \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

e o último parâmetro, vetor \mathbf{a} , sendo

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}; \quad (2.21)$$

ao rearranjar a Equação (2.17) para a Equação (2.18), os parâmetros de TMA são isolados do restante da equação no vetor $\boldsymbol{\xi}$. A matriz \mathbf{M}_k é definida como

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_k & 0 & \frac{1}{2}t_k^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_k & 0 & \frac{1}{2}t_k^2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

e o vetor de parâmetros $\boldsymbol{\xi}$ sendo dado por

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{a} \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

É importante notar que o objetivo principal dessa parte do estudo é estimar o vetor $\boldsymbol{\xi}$ pois através desse vetor pode-se calcular as posições assumidas pelo alvo nos instantes

de tempo t_k . Se o alvo permanecer com esses parâmetros inalterados, pode-se também prever a sua localização em um futuro imediato.

Nessa parte também será assumido que as posições de observação \mathbf{r}_k são conhecidas no exato instante em que marcações são estimadas. Exceto nos estudos sobre o desempenho dos algoritmos diante da incerteza da localização isenta de ruído.

Outros pressupostos estão descritos abaixo:

- O alvo se move com aceleração constante. Alvos com velocidade constante e alvos fixos são casos especiais com aceleração zero e velocidade zero, respectivamente. Como já foi mencionado, a escolha do modelo de estimação dependerá da taxa de realização de medidas estimadas em um intervalo de tempo T .
- A frequência em que são realizadas as estimações de marcações são assumidas constantes durante um intervalo de tempo de observação finito.
- As marcações são corrompidas por ruído gaussiano com média zero, gerando

$$\tilde{\theta}_k = \theta_k + n_k, \quad n_k \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2). \quad (2.24)$$

A variância σ_n^2 é assumida conhecida para propósitos de compensação de polarização, pode variar em função da distância entre o observador e o alvo (nesse trabalho ela foi considerada constante).

- O alvo é observável, i.e., é possível calcular todas as posições do alvo com marcações isentas de ruído através da estimação do vetor de parâmetros $\boldsymbol{\xi}$. Isso requer que o observador realize manobras durante a estimação de marcações (NARDONE, 1981).

Na Figura 2.2 está ilustrada uma geometria de TMA onde todos esses pressupostos são observados. Note que nessa figura o observador realiza uma mudança de parâmetros de TMA, a trajetória desse observador é composta por duas pernas, uma que tem seu início próximo ao eixo x e avança paralelamente ao eixo y e a manobra realizada faz com que o observador retorne em direção ao eixo x .

2.3.2.2 ESTIMADOR PSEUDOLINEAR

A solução fechada denominada estimador pseudolinear (*pseudolinear estimator*, PLE) proposta em (NARDONE, 1997), que reduz a complexidade computacional e lida com

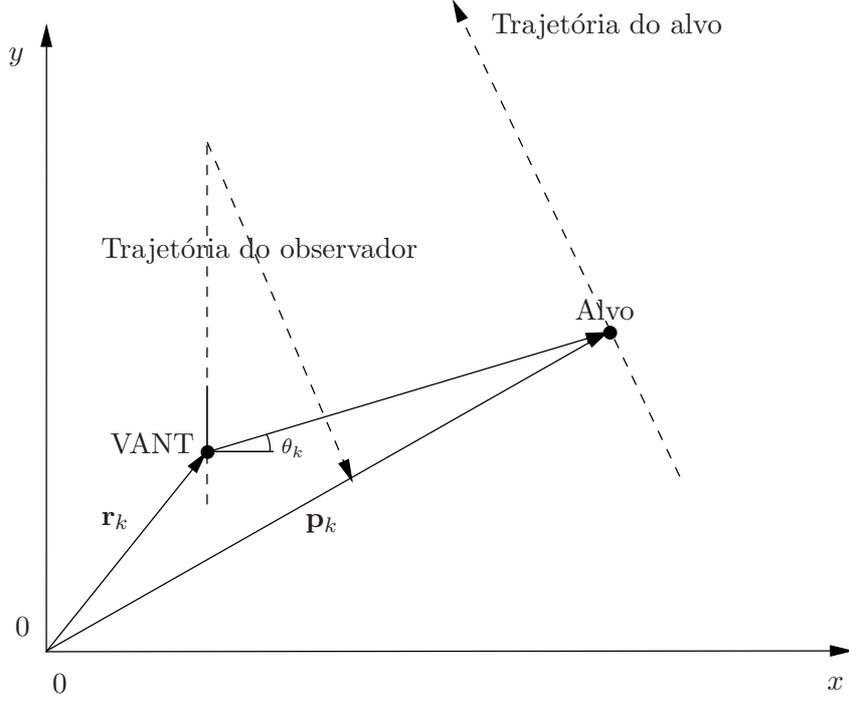


FIG. 2.2: Geometria de TMA considerada nesse trabalho.

problemas de convergência, pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\xi}}_{PLE} &= \arg \min \|\mathbf{F}\boldsymbol{\xi} - \mathbf{b}\|_2^2 \\ &= (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{b}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

onde a matriz \mathbf{F} é definida por

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^T \mathbf{M}_0 \\ \mathbf{u}_1^T \mathbf{M}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{N-1}^T \mathbf{M}_{N-1} \end{bmatrix}_{N \times 6}, \quad (2.26)$$

o vetor \mathbf{b} é dado por

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^T \mathbf{r}_0 \\ \mathbf{u}_1^T \mathbf{r}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{N-1}^T \mathbf{r}_{N-1} \end{bmatrix}_{N \times 1}, \quad (2.27)$$

e o vetor unitário \mathbf{u}_k sendo dado por

$$\mathbf{u}_k = \begin{bmatrix} \sin\tilde{\theta}_k \\ -\cos\tilde{\theta}_k \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

lembrando que n_k é uma variável aleatória com média zero e variância σ_n^2 . Note que o alvo não é observável se a matriz $\mathbf{F}^T\mathbf{F}$ for singular. De acordo com Doğançay (DOĞANÇAY, 2006), o estimador pseudolinear é polarizado, mesmo que o número de marcações $N \rightarrow \infty$. Nessa dissertação o termo polarização será utilizado para definir a norma da polarização do estimador definida como $\|\mathbb{E}\{\hat{\boldsymbol{\xi}}\} - \boldsymbol{\xi}\|_2$ (DOĞANÇAY, 2006).

2.3.2.3 ESTIMADOR PSEUDOLINEAR COM COMPENSAÇÃO DE POLARIZAÇÃO

Uma abordagem para diminuir a polarização do estimador pseudolinear foi proposta em (DOĞANÇAY, 2006). Nessa abordagem assume-se que a variância do ruído $\sigma_n^2(k)$ seja conhecida. Esse estimador é denominado como estimador pseudolinear com compensação de polarização (*bias compensation pseudolinear estimator*, BCPLE) e pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\xi}_{BCPLE} &= \boldsymbol{\xi}_{PLE} - \hat{\delta}_i \\ &= \boldsymbol{\xi}_{PLE} + (\mathbf{F}^T\mathbf{F})^{-1}(\mathbf{Q}\boldsymbol{\xi}_{PLE} - \mathbf{z}), \end{aligned} \quad (2.29)$$

onde $\hat{\delta}$ é a estimação da polarização do estimador pseudolinear, calculada com as marcações ruidosas disponíveis. A matriz $\mathbf{Q}_{6 \times 6}$ é dada por

$$\mathbf{Q} = \sum_{k=0}^{N-1} \mu_k^2 \mathbf{M}_k^T \mathbf{M}_k, \quad (2.30)$$

o vetor $\mathbf{z}_{6 \times 1}$ é

$$\mathbf{z} = \sum_{k=0}^{N-1} \mu_k^2 \mathbf{M}_k^T \mathbf{r}_k, \quad (2.31)$$

e o escalar μ_k^2 dado por

$$\mu_k^2 = \mathbb{E}\{\sin^2 n_k\}. \quad (2.32)$$

Novamente o alvo não é observável se a matriz $\mathbf{F}^T\mathbf{F}$ for singular. Esse estimador também não é assintoticamente despolarizado. Contudo, esse algoritmo é menos polarizado do que o estimador pseudolinear (DOĞANÇAY, 2006).

2.3.2.4 ESTIMADOR DE VARIÁVEIS INSTRUMENTAIS

Através do método de variáveis instrumentais (*Instrumental Variable, IV*) é possível tornar um estimador assintoticamente despolarizado, como o BCPLÉ (*bias compensation pseudolinear estimator*) é o estimador que se espera produzir menor polarização, ele será utilizado para esse propósito. O estimador IV pode ser escrito da seguinte forma

$$\boldsymbol{\xi}_{IV} = (\mathbf{G}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b}, \quad (2.33)$$

onde a matriz \mathbf{G} é dada por

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{v}}_0^T \mathbf{M}_0 \\ \hat{\mathbf{v}}_1^T \mathbf{M}_1 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{v}}_{N-1}^T \mathbf{M}_{N-1} \end{bmatrix}_{N \times 6}, \quad (2.34)$$

e o vetor unitário $\hat{\mathbf{v}}_k$ sendo

$$\hat{\mathbf{v}}_k = \begin{bmatrix} \sin \hat{\theta}_k \\ -\cos \hat{\theta}_k \end{bmatrix}, \quad (2.35)$$

as marcações utilizadas nesse estimador são estimadas da seguinte forma

$$\hat{\theta}_k = \angle(\hat{\mathbf{p}}_k - \mathbf{r}_k). \quad (2.36)$$

O vetor $\hat{\mathbf{p}}_k$ é estimado através da Equação (2.18) utilizando como vetor de parâmetros $\boldsymbol{\xi}_{BCPLE}$, o vetor estimado pelo estimador BCPLÉ.

A utilização de um vetor de parâmetros utilizando o BCPLÉ é uma tentativa de fazer com que a matriz \mathbf{G} se correlacione bem com a matriz \mathbf{F}_o (a matriz \mathbf{F}_o é uma versão sem ruído de \mathbf{F}) com o intuito de produzir uma matriz $\mathbf{G}^T \mathbf{F}$ bem condicionada .

$$\mathbf{F}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^T \mathbf{M}_0 \\ \mathbf{v}_1^T \mathbf{M}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{N-1}^T \mathbf{M}_{N-1} \end{bmatrix}_{N \times 6}, \quad \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} \sin \theta_k \\ -\cos \theta_k \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

A matriz $\mathbf{G}^T \mathbf{F}$ será não singular se $\mathbf{F}^T \mathbf{F}$ for não singular e se a matriz \mathbf{G} for suficientemente similar à \mathbf{F}_o .

2.3.2.5 CASOS PARTICULARES DO MODELO DE ESTIMAÇÃO COM ACELERAÇÃO CONSTANTE

Com uma simples substituição da matriz \mathbf{M}_k definida agora como

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_k & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_k \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

os estimadores passam a seguir um modelo para alvos com velocidade constante (não-nula) e aceleração nula.

Como resultado, o novo vetor de parâmetros $\boldsymbol{\xi}$ obtido pode ser definido como

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{v}_0 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Assim como os estimadores para alvos com aceleração constante, as posições do alvo também são estimadas através da Equação (2.18) utilizando a matriz redefinida \mathbf{M}_k e o vetor de parâmetros $\boldsymbol{\xi}_{4 \times 1}$ resultante.

Pode-se ainda observar que, se a matriz \mathbf{M}_k for definida como

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

e o vetor de parâmetros $\boldsymbol{\xi}$ dado por

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

o estimador passa a usar o modelo de estimação de velocidade nula, ou seja, um alvo fixo, tal como o método aqui descrito como mínimos quadrados lineares.

Nos próximos capítulos as técnicas descritas aqui serão utilizadas para realizar a estimação da localização de alvos. No Capítulo 3 um conjunto de técnicas será utilizado para avaliar a possibilidade de estimar a localização de atiradores utilizando um VANT, técnicas de estimação de marcações baseadas em sinais acústicos e técnicas de análise de movimento de alvos. No Capítulo 4 os algoritmos de TMA para alvos em movimento são analisados em um cenário tático naval. Com esse estudo será possível obter indicadores sobre o desempenho da estimação de parâmetros de TMA com a utilização de VANTs e marcações estimadas com a utilização de sensores típicos de Guerra Eletrônica.

3 MODELAGEM DO PROBLEMA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA ALVOS FIXOS

O primeiro problema a ser considerado é a estimação de parâmetros de TMA quando há poucas marcações disponíveis. Para atingir os objetivos iniciais dessa dissertação foi escolhido um cenário em que as marcações são estimadas através do processamento de sinais de tiro coletados por um arranjo de microfones embarcado em um VANT. Como não há um VANT que tenha um arranjo de microfones embarcado e comercialmente disponível que estime marcações através desse sinal de interesse os primeiros experimentos serão em um ambiente simulado.

Ainda nesse capítulo haverá uma fase experimental, serão coletados em campo sinais de tiro e serão abordadas questões como: a escolha da geometria do arranjo a ser montado em um VANT real, o desempenho de técnicas de melhoramento do sinal de interesse (*muzzle blast*), a acurácia de técnicas de estimação de DoA e a avaliação de técnicas de TMA para estimar a posição de um alvo fixo, um atirador nesse caso.

Ao terminar a revisão de literatura foi possível verificar que nenhum outro autor publicou um método para coletar sinais de tiro usando um arranjo de microfones montado em um quadricóptero e usou esses sinais para estimar a DoA de um atirador (ou alvo). Com essas marcações poderia ser utilizado um método para estimar a localização do atirador. Muitos métodos de TMA que usam diferentes medidas podem ser considerados para localizar um alvo como mencionado anteriormente. Nesse trabalho a única informação disponível sobre o atirador são as poucas marcações estimadas que por sua vez são estimadas através da *muzzle blast*.

Além disso, em muitas situações reais como em áreas urbanas com fogo cruzado, um conjunto de sinais de tiro pode estar disponível. Isso permite a utilização de técnicas de BO-TMA para estimar a localização do atirador.

Nos casos em que há um conjunto de sinais de tiro capturados por um VANT em diferentes posições, técnicas de BO-TMA deveriam ser utilizadas para estimar a localização do atirador. Isso permitiria determinar a localização do atirador sem a necessidade da componente *shock wave* (FREIRE, 2011) ou um mapa digital de alta resolução (PAREDES CALDERON, 2015).

Para o problema de localização do atirador em duas dimensões os pressupostos presentes na Seção 2.3.1 são considerados. Um número considerável de algoritmos de BO-TMA foram propostos desde a década de 60 (COHEN, 1964) e sucessivos trabalhos têm sido publicados, desde então (LINGREN, 1978; NARDONE, 1984; KRONHAMN, 1998; DOĞANÇAY, 2005b; ZHANG, 2010, 2016). Em adição, os algoritmos de BO-TMA podem ser usados também para melhorar a acurácia dos parâmetros da navegação do observador (ALEXANDRI, 2016). Nesse trabalho, nós consideramos os mínimos quadrados lineares (LS) e os mínimos quadrados totais (TLS) para a estimação da posição do atirador (DOĞANÇAY, 2005a).

Inicialmente, serão realizadas simulações utilizando a ferramenta Matlab[®] para obter resultados iniciais sobre a viabilidade do emprego do método proposto nessa dissertação para ser utilizado em situações reais. Após a análise dos resultados das simulações foram coletados sinais reais de tiro em campo para a validação do método.

3.1 SIMULAÇÕES

Os resultados iniciais para a estimação da posição do atirador serão obtidos através da estimação da direção de chegada de sinais de tiro sintetizados. A partir das marcações estimadas, será realizado um processamento adicional para estimar a localização do atirador em um plano 2D.

3.1.1 MODELO DOS SINAIS

Para simular os sinais capturados com esse arranjo, cópias defasadas de um sinal de tiro real que faz parte da base de dados do IME, foram corrompidas com ruído real do quadricóptero. As amostras do ruído do VANT foram coletadas usando um microfone omnidirecional colocado na base do VANT quando o VANT estava plainando em um ambiente silencioso. É realizado um janelamento aleatório do ruído do VANT para ser adicionado a cada cópia defasada do sinal de tiro com uma razão sinal ruído apropriada.

Com o intuito de estimar a SNR, medidas foram feitas para as distâncias de 41, 117, 149, 174 e 200 metros. Todos os sinais de tiro usados nesse experimento inicial foram originados por um rifle 7,62 mm e gravados por um arranjo estacionário (sem o ruído do quadricóptero). Expressando, para uma distância d , $x_1[n] = s[n] + n_1[n]$, ($x_1[n]$ o sinal de tiro ruidoso, $s[n]$ o sinal de interesse limpo e $n_1[n]$ o ruído ambiente) foi possível estimar

σ_s^2 e $\sigma_{n_1}^2$ como $\hat{\sigma}_s^2 = \hat{\sigma}_{x_1}^2 - \hat{\sigma}_{n_1}^2$ (de uma janela de 7,5ms contendo a *muzzle blast*), $\hat{\sigma}_{n_1}^2$ foi obtida de uma janela de 7,5ms com ruído do ambiente somente.

Essa estimativa inicial não considerou o ruído causado pelas hélices do VANT. Na etapa de simulação, a SNR é a chave para que se possa ter sinais de tiro sintetizados razoáveis e é preciso que se considere o ruído do VANT para simulações mais realistas. Como a distância entre as hélices do VANT e os microfones do arranjo não muda e assumindo velocidade das hélices constante (quando o VANT está plainando), a variância do ruído aditivo $n_2[n]$, $\sigma_{n_2}^2$, pode ser considerada fixa. Através dos dados adquiridos do VANT em um ambiente silencioso, foi possível obter $\hat{\sigma}_{n_2}^2$, uma estimativa da variância $\sigma_{n_2}^2$ do ruído das hélices $n_2[n]$.

Assumindo que as gravações (sinais de tiro e do ruído do VANT) foram realizadas sob condições similares (mesmo ganho do pré-amplificador, mesmos microfones, etc.) foi possível computar os valores da SNR para um sinal de tiro gravado por um arranjo embarcado em um VANT, dado por

$$\text{SNR} = 10 \log \left(\frac{\hat{\sigma}_s^2}{\hat{\sigma}_{n_1}^2 + \hat{\sigma}_{n_2}^2} \right), \quad (3.1)$$

e mostrados na Figura 3.1. Nessa figura, uma curva interpolada da SNR (em dB) é mostrada para distâncias que variam de 20 a 200 m. Para verificar a exatidão das estimativas da Figura 3.1 três sinais de tiro reais foram gravados com um microfone embarcado em um quadricóptero (Parrot AR 2.0) enquanto esse estava plainando. A distância entre o quadricóptero e o atirador é de 102 m. A SNR estimada desses sinais é de 3,1 dB, que é um valor mais alto que o apresentado na Figura 3.1 (1,5 dB para $d = 102$ m).

Com o intuito de obter estimativas de DoA e de localização do alvo em uma trajetória comum que VANTs poderiam percorrer (retilínea, por exemplo) observando as condições de observabilidade conforme mostra a Figura 2.1, foi utilizada uma trajetória como está ilustrada na Figura 3.2. Nessa figura, pode-se observar a trajetória retilínea percorrida pelo VANT.

Na Figura 3.3 pode-se observar que essa trajetória é observável já que existe um único ponto de interseção das marcações isentas de ruído (θ).

3.1.2 RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

O método proposto para estimar a localização do atirador foi avaliado primeiramente em termos de estimativa de DoA. Então, algoritmos de BO-TMA foram comparados em

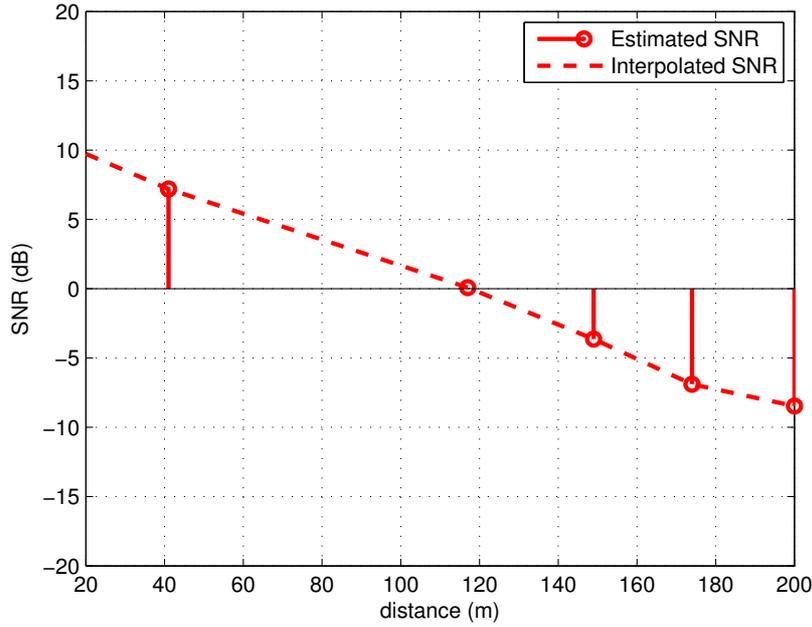


FIG. 3.1: SNR estimada×distância para um rifle 7,62mm (FAL).

termos de polarização dos estimadores (ou média do erro de estimação em metros).

3.1.2.1 ESTIMAÇÃO DE DOA DOS SINAIS SINTETIZADOS

Na Tabela 3.1, o desempenho dos algoritmos ES e ILS foram comparados em termos de erro angular. A distância é fixa e o ângulo de incidência no arranjo é aleatório. O espaço amostral tem 1.000 estimações. Técnicas de melhoramento de sinal foram combinadas com os algoritmos de estimação de DoA para avaliar se é possível melhorar os sinais de tiro corrompidos pelo ruído produzido pelo VANT. A métrica utilizada foi o erro médio quadrático (EMQ), dado por

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\theta_k - \hat{\theta}_k)^2. \quad (3.2)$$

De acordo com a Tabela 3.1, o menor EMQ para as distâncias de 50 e 150 metros foram conseguidas usando o ES(6) (usando seis pares disponíveis de um total de $C_2^5 = 10$ pares de microfones) e filtro de mediana. As frentes de ondas podem ser visualizadas no domínio do tempo na Figura 3.4. Note que a subtração espectral melhora o formato de onda da *muzzle blast*, mas picos adicionais foram criados. Esses picos podem degradar a

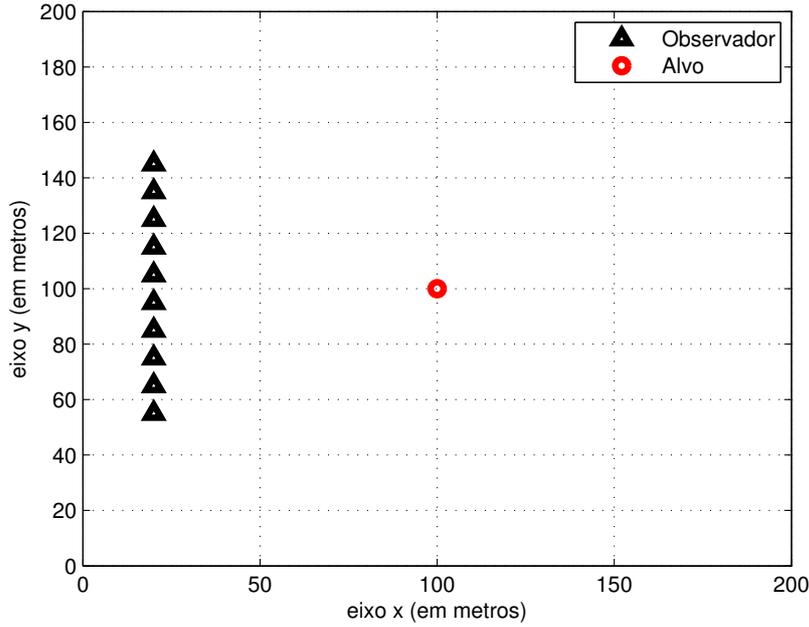


FIG. 3.2: Posições do observador em que os sinais de tiro são coletados.

estimação de DoA. De fato, a combinação de ES e SS resultam em um desempenho ruim de estimação de DoA mesmo para distâncias pequenas como 50 m. De outro lado o filtro de mediana melhora a *muzzle blast* sem criar picos adjacentes adicionais.

Para distâncias de 190 e 200 metros, o ES(6) mostrou ser um algoritmo robusto, uma vez que o erro não aumentou tanto se comparado com outras combinações de técnicas de melhoramento do sinal e estimação de DoA. Em situações reais, o VANT pode estar perto ou longe do atirador quando um tiro acontece. Como resultado, o ES(6) será utilizado por sua robustez.

A Tabela 3.2 mostra o erro médio (em metros) da distância entre a verdadeira localização do atirador e as posições estimadas, $\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}\|$. Esse experimento foi conduzido considerando dez DoAs estimadas usando ES(6). Para BO-TMA, os estimadores LS e TLS foram utilizados; o TLS mostrou ser o algoritmo menos polarizado, exceto para as distâncias de 50 m onde o erro é o mesmo. O espaço amostral teve 1.000 rodadas independentes. A distância considerada nesses resultados corresponde a uma média das distâncias entre a primeira e a última posição em que ocorreram as medidas, como ilustrado na Figura 3.3.

A Tabela 3.3 mostra o erro quando a distância é fixa e o número de medidas varia de 3 a 10. Como o número de medidas diminui o erro médio aumenta.

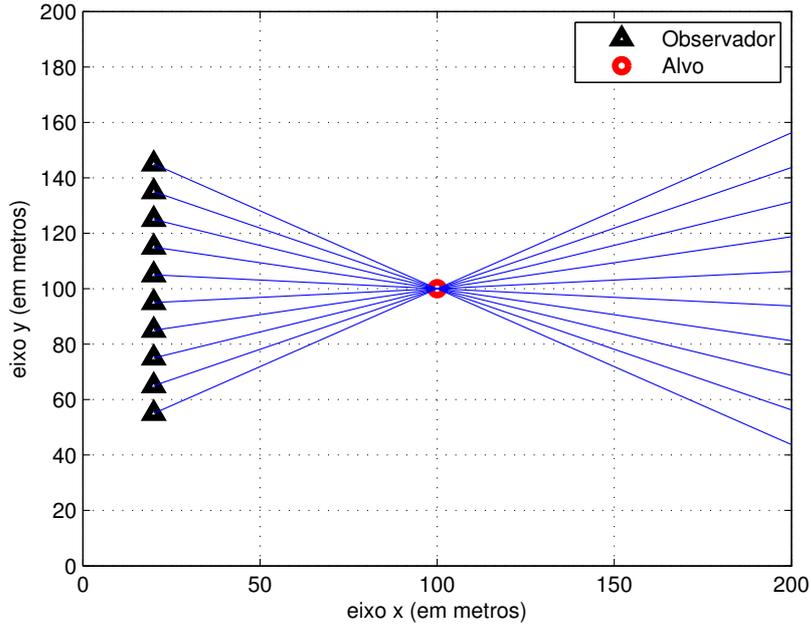


FIG. 3.3: Ilustração das marcações sem ruído que produzem uma única interseção.

3.1.3 RESULTADOS EM AMBIENTES REAIS

O método proposto nesse momento tanto para estimar a localização do atirador quanto para estimar as marcações do atirador é avaliado com sinais coletados em campo. Os algoritmos de estimação de DoA são comparados e os algoritmos de BO-TMA são comparados em termos de polarização dos estimadores (ou média do erro de estimação em metros).

3.1.4 AQUISIÇÃO DE SINAIS

O método proposto para avaliar o desempenho de um arranjo de microfones montado em um VANT do tipo quadricóptero é dividido basicamente em três partes. A primeira é o projeto do arranjo de microfones a ser embarcado no VANT. A segunda é referente às posições que o drone irá assumir em relação ao atirador. Finalmente, a última é a escolha de uma solução apropriada para estimar marcações que levam em consideração a geometria do arranjo, o cenário e a possibilidade de se utilizar as marcações estimadas para estimar a localização do atirador, ou seja, que seja possível utilizar marcações que permitam que o alvo seja observável ao utilizar técnicas de BO-TMA para alvos fixos.

O projeto de um arranjo para ser embarcado em um VANT deve levar em consideração

TAB. 3.1: EMQ azimutal para diferentes técnicas de melhoramento de sinal (MS) e de estimação de DoA

Técnica		Distância (em metros)			
DoA	MS	50	150	190	200
ES(6)	nenhum	0,036	2,124	6,042	7,513
	MF	0,005	0,877	35,911	73,465
	SS	0,522	3,648	70,842	161,132
ILS	nenhum	0,423	41,749	61,683	142,497
	MF	0,408	26,123	216,462	426,335
	SS	13,248	32,414	240,101	533,242

TAB. 3.2: Erro de localização $\|\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}\|$ médio (com dez medidas) versus a distância

Técnica	Distância do atirador (em metros)						
BO-TMA	50	100	150	180	190	200	220
LS	0,22	1,07	5,86	12,50	15,76	18,76	29,76
TLS	0,22	1,05	5,60	12,08	14,46	16,41	24,91

a falta de espaço disponível no VANT utilizado (AR Parrot 2.0 drone). Em um trabalho anterior (FERNANDES, 2016) imaginou-se que os microfones poderiam ser instalados na cruz do drone (a parte do drone onde as hélices são instaladas em cada extremidades). Mas, deveria ser notado que, quando se instala um microfone eletreto nessa região, o vento produzido pelas hélices causa um ruído aditivo muito intenso; também deve-se levar em consideração que os eletretos são sensíveis às vibrações produzidas pelos componentes do drone e possivelmente à interferência eletromagnética. O ruído aditivo causado pelo vento foi evitado ao usar um aparato para proteger cada microfone. O segundo problema (as vibrações do drone) não puderam ser evitadas apropriadamente, então os microfones foram instalados na base do drone. Esse lugar naturalmente protegeu os microfones das

TAB. 3.3: Erro de localização (distância média de 190 metros)

Técnica	# Medidas							
BO-TMA	3	4	5	6	7	8	9	10
LS	103,76	55,39	40,68	31,68	25,51	21,42	18,33	15,76
TLS	92,76	64,75	46,51	32,12	24,44	19,91	16,95	14,46

vibrações devido, muito possivelmente, ao material em que a base do drone é fabricada e também protegeu do vento causado pelas hélices. Nós assumimos que a interferência eletromagnética não era tão forte a ponto de afetar os resultados do experimento. Os microfones e suas coordenadas podem ser vistos na Figura 3.5. Essa figura é uma visão do drone como se ela fosse feita do solo enquanto o drone está pairando no ar.

Assume-se que o local onde os sinais de tiro foram coletados é plano, dado que o drone foi ajustado para pairar em uma altura muito aproximada da altura do atirador. Isso foi feito intencionalmente para possibilitar uma maneira fácil de avaliar se as coordenadas do drone (posição) estavam corretas. Como assumimos que o ângulo de elevação é conhecido, o método de estimação de marcação empregado nessa parte do trabalho será a solução 2D, ou seja, nesse trabalho estamos interessados somente na estimação do azimute. Portanto, a matriz \mathbf{R} para a estimação do azimute é de posto completo (*full rank*).

Os sinais de tiro reais usados nessa parte da dissertação foram gravados em um ambiente plano localizado no Centro de Avaliações do Exército (CAEx) em um dia ensolarado com uma velocidade do vento em torno de 10 Km/h e temperatura em torno de 23 graus Celsius. Foram coletados 120 sinais de tiro de um rifle IA2 7,62mm de diferentes posições e diferentes ângulos de incidência. As distâncias variam de 50 a 164 metros e os ângulos de incidência variam desde -45° à 68° . Na Figura 3.6 são ilustrados sinais sem processamento coletados de distâncias atirador-drone de 58,3 m e 127,2 m como também os sinais após a filtragem da subtração espectral e filtro de mediana. Pode ser notado que, na Figura 3.6 (e), possíveis reflexões do sinal mudaram suas amplitudes. Os sinais sem processamento possuem o primeiro pico mais pronunciado, o que significa que os esquemas de melhoramento do sinal não tiveram tanto sucesso em melhorar o pico correto, especialmente para sinais com SNR baixa. Contudo, pode-se observar que na Figura 3.6 (c), o filtro de mediana melhorou o segundo pico (uma reflexão) do sinal. Esse comportamento do filtro de mediana é esperado, uma vez que as reflexões também são sinais impulsivos. Mas esse comportamento acaba por degradar a estimação da marcação. Esses resultados nos indicam que, neste experimento, utilizar os sinais sem pré-processamento pode nos levar a estimativas das marcações mais acuradas. Não obstante, nós acreditamos que investigações futuras sobre a utilização do filtro de mediana poderia levar a melhores resultados, como por exemplo descartar os picos tardios que, possivelmente estão associados a reflexões.

Três tiros de um rifle 7,62 mm foram disparados em 10 diferentes posições do atirador e nós gravamos de 4 localizações diferentes usando um arranjo de 5 microfones montados

TAB. 3.4: Número de sinais de tiro coletados para cada distância entre observador-atirador (em metros)

Distância	50,9	58,3	70,7	76,1	86,0	90,5	94,8	98,9	100,4	102,9	104,4	111,8
#tiros	6	6	11	6	19	5	5	2	6	9	6	6
Distância	114,0	120,8	122,0	127,2	130,3	134,5	139,2	142,1	147,6	148,6	158,1	164,0
#tiros	6	3	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2

em um quadricóptero. As posições do atirador e do arranjo estão ilustradas na Figura 3.7. O quadricóptero, um PARROT AR.Drone 2.0, começa o vôo da posição Q1 até Q4 e grava três sinais de tiro em cada posição. Esse procedimento foi repetido 10 vezes para coletar 30 sinais de tiro para cada posição do atirador, S1 até S10.

Para um experimento mais controlado objetivando minimizar erros devido à inacurácia do GPS, nós gravamos 3 tiros por posição do atirador e o atirador se moveu para a próxima posição. Somente então o quadricóptero se moveu para simular o vôo. Portanto, não há efeito Doppler já que o quadricóptero estava na verdade plainando em cima de cada posição de gravação.

A DoA é estimada usando a técnica ES e a correlação cruzada generalizada com transformada de fase (GCC-Phat) para encontrar a melhor combinação de quatro pares de estimações de diferença de tempo de chegada. Alegadamente, $n=4$ seria o melhor número de combinações para um arranjo de sete microfones com uma SNR em torno de -7 dB (BORZINO, 2015b).

3.1.4.1 RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO DE DOA

Na Figura 3.8 (a) está ilustrado o valor médio do erro de estimação das marcações para cada distância baseado nas estimações realizadas para cada conjunto de sinais de tiro com a mesma distância usando a busca exaustiva para quatro e três estimações de TDoA, ES(3) e ES(4). O conjunto de tiros não é tão grande, o número de sinais de tiro para cada distância varia como pode ser visto na Tabela 3.4. Também na Figura 3.8 (a), é possível visualizar que os erros tendem a crescer com a distância e as melhores estimações, na média, são conseguidas ao utilizar o ES(4).

Na Figura 3.8 (b), está ilustrado um histograma do erro angular ($\hat{\theta} - \theta$) obtido através da estimação de sinais reais de tiro. O pico do histograma está em $e_\phi = -4$. Uma distribuição Gaussiana desse histograma apresentaria um valor médio de -2,95 graus e um desvio padrão de 5,13 graus.

3.1.4.2 ESTIMAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO

Para realizar a estimação da localização do atirador somente o azimute estimado do atirador está disponível. Como já foi mencionado, essa configuração 2D é empregada porque o quadricóptero é colocado na mesma altura dos atiradores implicando um ângulo de elevação fixo próximo a zero (ou, equivalentemente, um ângulo zenital próximo a 90 graus). Como os resultados anteriores sugerem que técnicas de melhoramento de sinal não são efetivas para todas as distâncias nessa aplicação, decidimos realizar a detecção e estimação de DoA diretamente dos sinais gravados (sem pré-processamento).

A Tabela 3.5 mostra os resultados de estimação de DoA e de localização. A média do módulo do erro azimutal ($|\hat{\theta} - \theta|$) para esse experimento é de $5,7^\circ$, usando ES(4) e nenhuma técnica de melhoramento de sinal. É importante notar que a posição do atirador em relação à trajetória tem uma grande influência na acurácia das estimações de localização. Deve ser observado que para as posições 3 e 4 (S3 e S4), os erros médios de estimação de DoA são baixos devido às pequenas distâncias, conseqüentemente maior SNR. Contudo, o erro de localização é maior quando as posições em que o arranjo coleta os sinais forma uma linha reta quase em direção ao atirador. Esse é um caso extremo que configura uma trajetória que faz com que o alvo seja não observável, portanto as estimações de posição melhoram para as posições S5 e S6 para a mesma trajetória do VANT e degrada novamente devido às grandes distâncias e conseqüentemente menor SNR.

TAB. 3.5: Erro de estimções de localização e DoA (120 sinais de tiro) com ES(4)

Atirador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
e_{Loc}	29,7	20,7	54,0	42,9	29,6	18,3	29,7	36,5	60,8	73,3
e_{DoA}	6,6	4,0	6,7	3,3	3,4	3,7	4,6	4,8	5,5	14,5

Para lidar com o problema da SNR variável, em uma tentativa de melhorar os resultados, variamos n , o número de pares no algoritmo ES(n), de dois a cinco (de um máximo de 10 possíveis pares) e escolhemos o melhor resultado para cada posição do atirador. Com essa abordagem, a média do módulo do erro azimutal diminuiu para $5,0^\circ$, na Tabela 3.6 pode-se observar a média do módulo do erro azimutal para cada atirador. Como pode ser observado, o número de pares n varia com a posição do atirador e a distância, como esperado. Esses resultados sugerem que medir a SNR e decidir com base no seu valor estimado qual n utilizar, como em uma árvore de decisão (BORZINO, 2016), seria o

melhor para uma solução mais acurada. Pode-se observar que melhores estimações de DoA nem sempre minimizam o erro da estimação da posição do alvo, essa estimação é altamente dependente da geometria do ambiente (pontos de observação ou trajetória do quadricóptero).

TAB. 3.6: Erro de localização e DoA e respectivo número de pares n usado na busca exaustiva $ES(n)$ (120 sinais de tiro)

Atirador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	4	2	4	3	3	4	4	4	4	2
e_{Loc}	29,7	21,5	54,0	50,7	27,6	18,3	29,7	36,5	60,8	93,6
e_{DoA}	6,6	3,7	6,7	2,7	2,6	3,7	4,6	4,8	5,5	9,9

As estimações das posições do atirador são mostradas na Figura 3.9 onde as posições 4 e 6 estão em evidência. Para a posição 6, o erro de estimação de DoA é baixo (3,7 graus em média) devido à SNR alta (proximidade do arranjo em relação ao atirador) enquanto que o caminho de vôo do quadricóptero (as posições em que as DoAs são estimadas em relação à posição do atirador) não está alinhado com a trajetória não observável. Como consequência, as estimações têm erro de localização baixo. As coordenadas das estimações tendem a formar uma elipse perto da verdadeira posição do atirador. Todas essas estimações dentro de uma área de aproximadamente 600 m². Embora o erro de estimação de marcação seja baixo, as estimações de localização do atirador 4 são degradadas devido à trajetória do arranjo. Pode-se observar que a posição 4 do atirador tem estimativas de localização que cobrem uma grande área (em torno de 3600 m²). Isso sugere que em situações reais deveria ser considerado a trajetória do arranjo para minimizar erros de localização.

3.2 DISCUSSÃO

Conforme indicam os resultados simulados que foram publicados em (FERNANDES, 2016), quando um conjunto de *muzzle blasts* é coletada por um VANT em diferentes posições, como usualmente ocorre em um ambiente de fogo cruzado, torna-se viável utilizar uma abordagem estatística para estimar a localização do atirador. Na parte do trabalho em que foram simuladas as posições do atirador, do observador e foram sintetizados sinais de tiro, advogamos que uma combinação da busca exaustiva e TLS pode

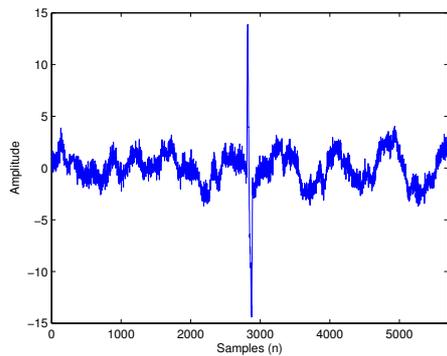
produzir boas estimações para a localização do atirador. A acurácia depende da distância, da trajetória e do número de medidas disponíveis. Conforme a distância cresce o número de medidas utilizadas deve ser maior para manter o mesmo erro de localização. Melhores resultados poderiam ser obtidos se o atirador estivesse dentro de um raio de 150 m, onde é possível, depois de uma primeira estimação, refinar os resultados utilizando o filtro de mediana para obter uma melhor estimação de DoA. Finalmente, concluímos que a localização de um atirador utilizando a acústica e um VANT tem, pelo menos, três pontos para a otimização dos resultados, especificamente: melhoramento do sinal, estimação de DoA e localização do alvo.

Após os comentários dos resultados das simulações, discutimos os resultados para a estimacão de DoA de sinais de tiro reais e a aplicacão das técnicas para o melhoramento do sinal de interesse. Tais resultados foram publicados em (FERNANDES, 2017a). Esse trabalho mostra que um arranjo de microfones montado em um drone apesar do forte ruído causado pelas hélices pode ser utilizado para estimar marcações de um atirador através da técnica da busca exaustiva. A acurácia das marcações dependem do lugar em que os microfones são instalados, a distância atirador-VANT e a solucão a ser utilizada para a estimacão das marcações. Além disso, embora pareça que a instalacão de microfones em um drone seja uma tarefa simples, essa parte do trabalho pode ser decisiva para uma boa acurácia das estimacões.

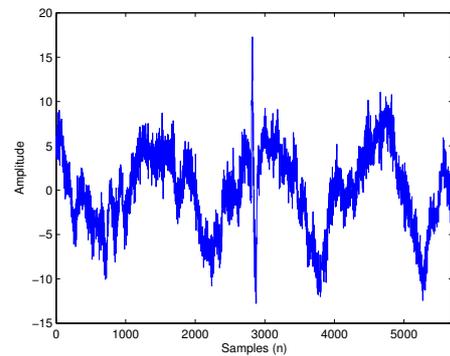
A técnica de busca exaustiva (BORZINO, 2015b) com $n = 4$ provou ser uma boa técnica para melhorar a estimacão das marcações. Os resultados para a estimacão de atiradores é beneficiado pela mobilidade do drone, se um tiro é detectado o drone pode voar em direçã à marcação para diminuir a distância do atirador e possibilitar melhores estimacões (se outros tiros são disparados). Quando se trabalha com VANTs, a falta de linha de visã direta pode ser evitada se o drone voa em altas altitudes. O VANT é uma opçã possível para ser empregado em áreas urbanas. Técnicas de melhoramento de sinal podem ser uma chave para melhorar os resultados obtidos nessa parte do trabalho, especificamente quando a distância atirador-VANT é grande. Esse é um tópic que continua aberto a pesquisas futuras. Finalmente, os resultados práticos obtidos com os sinais reais de tiro validam os resultados obtidos através de simulações obtidos anteriormente (FERNANDES, 2016).

Finalmente, discutimos os resultados para a estimacão da localizacão do atirador com as marcações obtidas de sinais reais de tiro. Esses resultados foram publicados em (FER-

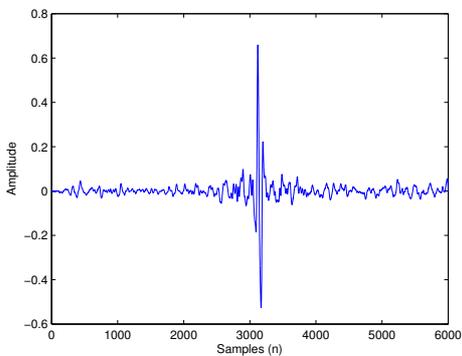
NANDES, 2017b). Esse trabalho mostra que, dentro de algumas limitações, as marcações estimadas através da busca exaustiva podem ser usadas para estimar a localização do atirador usando um arranjo de microfones montado em um quadricóptero. A acurácia da estimação da localização depende do número de medidas disponíveis, a distância entre o arranjo e o atirador e a trajetória. Além disso, o número de medidas necessárias deve aumentar conforme a distância arranjo-atirador aumenta para manter o mesmo erro médio de localização. Os resultados para a localização do atirador usando um drone são um compromisso entre a distância arranjo-atirador e a trajetória do drone. Nós também destacamos a importância de um vôo em altas altitudes para evitar a falta de linha de visão direta nas gravações e a existência de reflexão, possivelmente mais forte que a componente direta do sinal. Apesar dessas restrições, como apontadas nesse trabalho, o quadricóptero parece ser uma opção factível para ser usada em áreas urbanas. Ainda, um esquema de melhoramento de sinal mais apropriado para o problema em questão permanece um tópico interessante para futuras pesquisas. Finalmente, pudemos observar que os resultados práticos para estimação da localização obtidos são consistentes com as simulações obtidas previamente (FERNANDES, 2016).



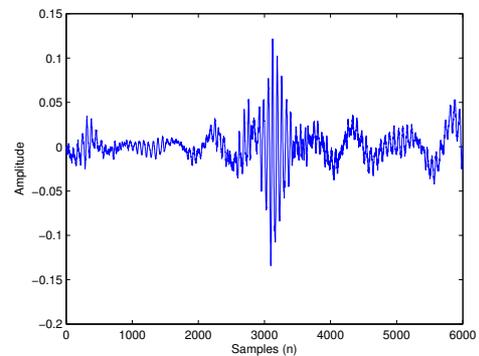
(a) Tiro 50 m (sinal original)



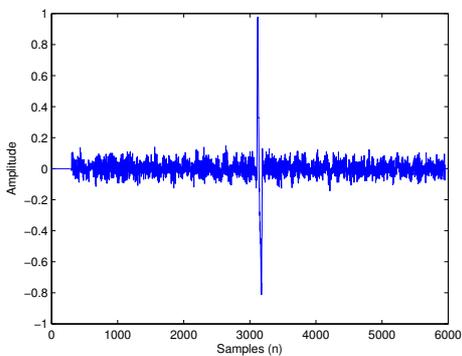
(b) Tiro 150 m (sinal original)



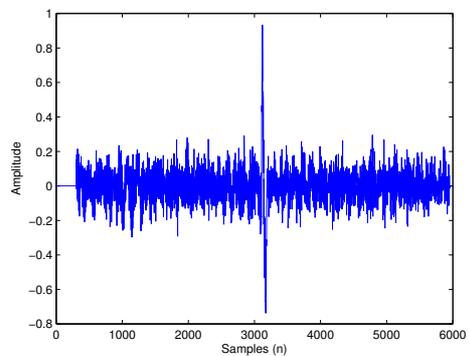
(c) Tiro 50 m com subtração espectral



(d) Tiro 150 m com subtração espectral



(e) Tiro 50 m com filtro de mediana



(f) Tiro 150 m com filtro de mediana

FIG. 3.4: *Muzzle blast* modelada de um rifle FAL, afastada 50 m da posição do observador (à esquerda) e afastada 150 m da posição do observador (à direita). (a) e (b) sem técnica de melhoramento do sinal. (c) e (d) com subtração espectral. (e) e (f) com filtro de mediana.

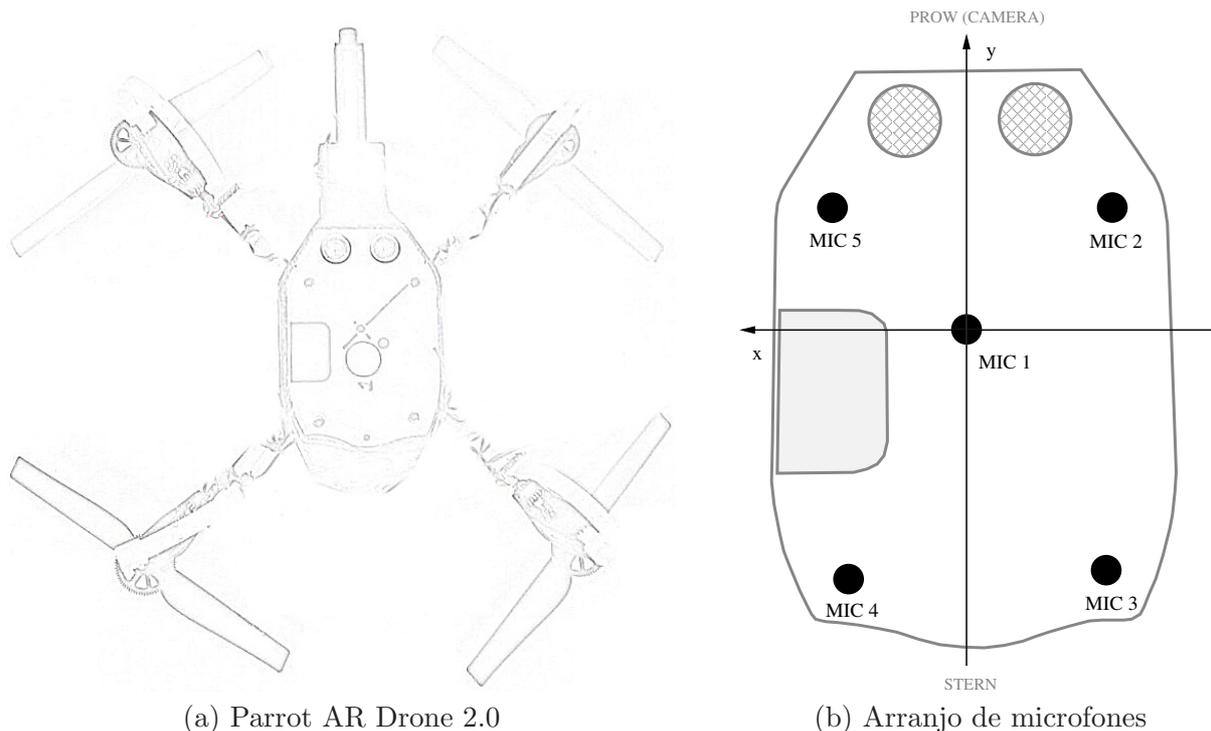


FIG. 3.5: Arranjo de microfones montado na base do quadricóptero AR Parrot 2.0 Drone. Visão da parte inferior do drone.

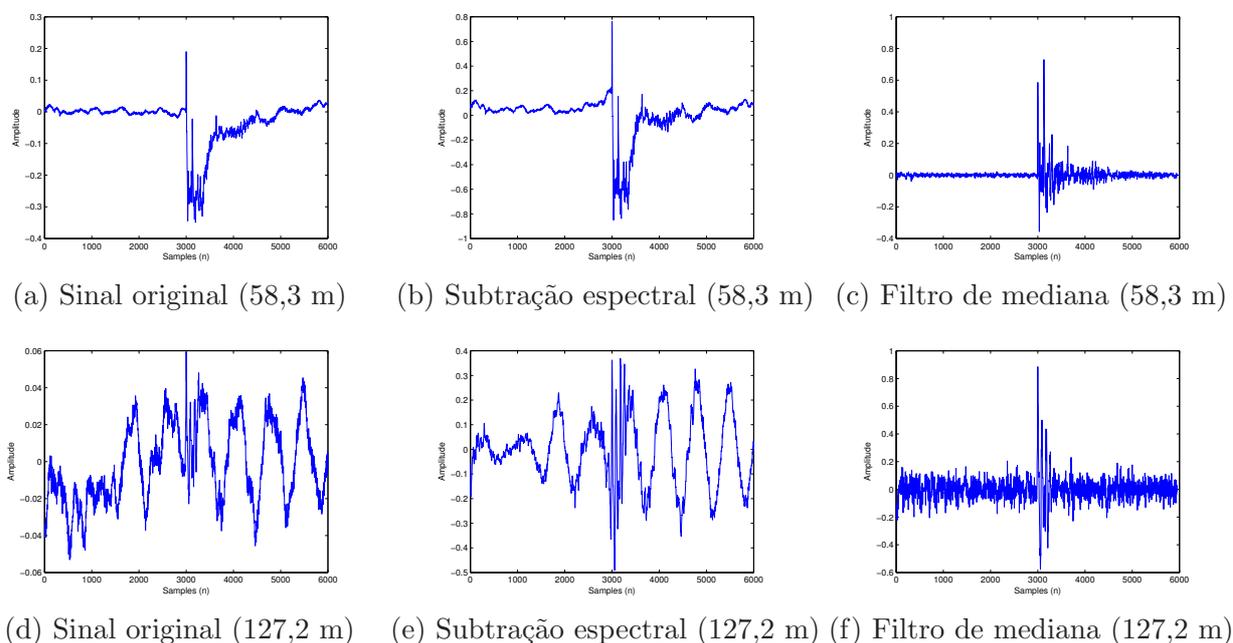


FIG. 3.6: Sinais de tiro (IA2 7,62mm) coletados de um VANT. Gráficos da parte superior foram coletados a uma distância de 58,3 m observador-atirador e os gráficos da parte inferior a uma distância de 127,2 m observador-atirador: (a) e (d) sinais sem pré-processamento; (b) e (e) subtração espectral; (c) e (f) filtro de mediana.

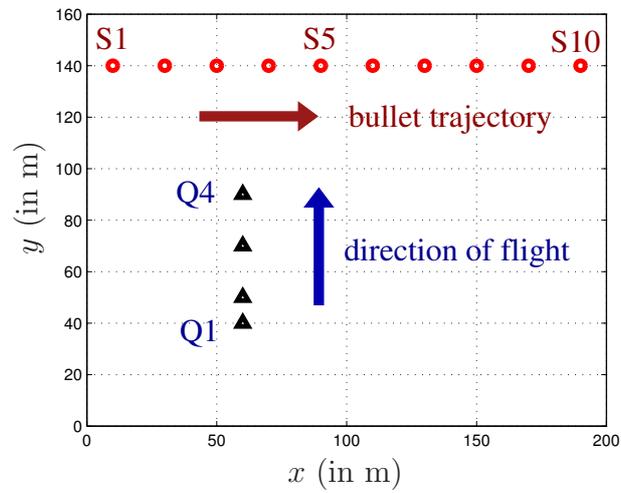


FIG. 3.7: Geometria de TMA.

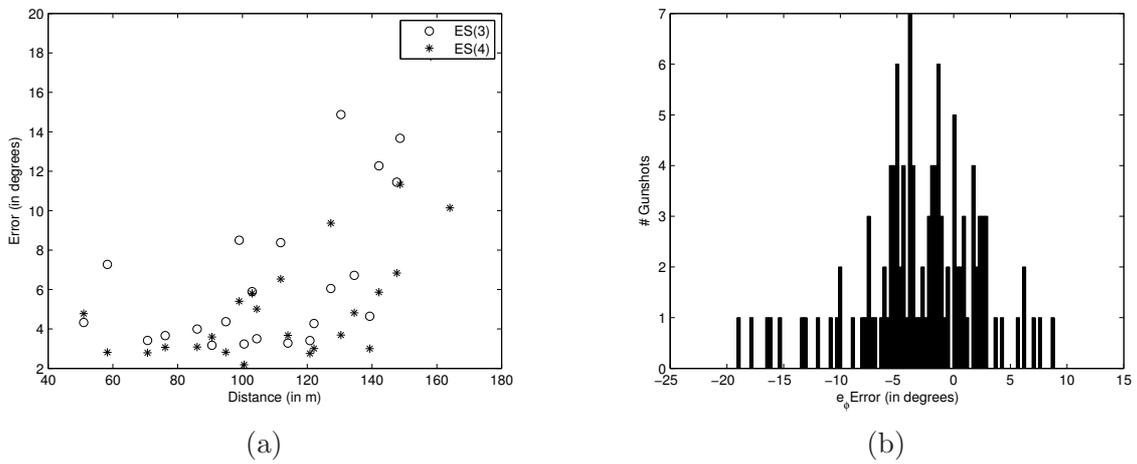


FIG. 3.8: (a) Relação entre a média do erro de estimação de DoA & distância. (b) Histograma do erro.

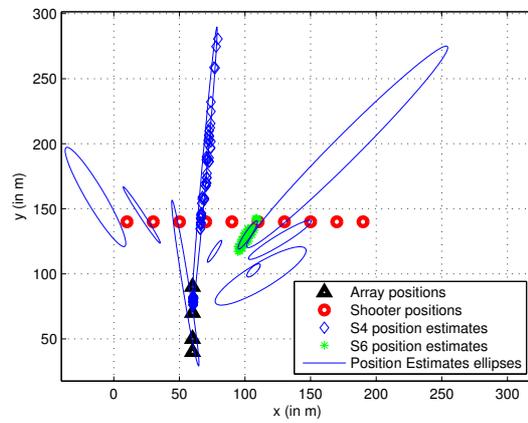


FIG. 3.9: Estimacões da localizacão do atirador: note que as melhores estimativas sãõ aquelas com a menor distância do atirador-VANT e dentro de um ângulo que não configura um alvo não-observável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE A ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE TMA

Nesse capítulo o problema a ser considerado é a estimação de parâmetros de TMA de um alvo em movimento utilizando marcações obtidas através de sensoriamento passivo. A utilização de sensores passivos é uma vantagem porque permite coletar sinais emitidos por sensores ativos de um inimigo sem a necessidade da emissão de sinais, ou seja, permite realizar o sensoriamento de uma área sem que o inimigo consiga detectar que está sendo sensoriado. Dessa forma é possível obter parâmetros de um inimigo (tais como velocidade, aceleração e rumo) de forma a permitir que sejam utilizadas as contramedidas apropriadas. Os sensores passivos são um meio pelo qual militares conseguem informação tática sem necessidade de forças colaborativas. Além disso, os sensores passivos junto com as contramedidas de guerra eletrônica (GE) podem mitigar a efetividade das armas dos adversários controladas por infravermelho e rádio-frequência (RF). A guerra eletrônica melhora a sobrevivência de uma força em território inimigo através do controle e manipulação do ambiente eletromagnético e nega ou limita ao adversário a utilização de equipamentos eletrônicos que são fundamentais para os meios militares (SPEZIO, 2002).

Para ressaltarmos a importância de um sensor passivo, exemplificamos um sistema radar típico que contém um transmissor que produz um forte sinal de RF; uma antena ou um arranjo de antenas que irradia energia e coleta os ecos refletidos; um receptor que detecta o sinal de retorno e um sistema de processamento eletrônico que extrai desses sinais as medidas do alvo como: distância, marcação e velocidade. As informações sobre a localização do alvo podem, então, ser fornecidas a um sistema de armas para direcionar uma arma a um alvo (SPEZIO, 2002). Nesse contexto, o sinal radar, sendo um sensor ativo, poderia ser detectado por sensores do adversário que então poderia utilizar contramedidas para mitigar os efeitos de um possível ataque por armas, por exemplo.

Quando se deseja agir furtivamente, deve-se seguir as melhores práticas de GE, ou seja, a emissão de um sinal radar deveria ser evitada dentro do contexto de GE e o sensoriamento deveria acontecer com sensores passivos. Dessa forma, pode-se evitar que o inimigo detecte sinais provenientes do radar. Contudo, ao utilizar sensores passivos menos informação é conseguida. Muitas vezes os únicos dados que se consegue estimar

são somente marcações, portanto surge a necessidade de um processamento adicional para estimar os parâmetros do alvo. Como já mencionado anteriormente, os algoritmos de BO-TMA podem processar marcações para obter esses parâmetros; nesse capítulo os modelos de estimação para alvos com velocidade constante não-nula e para aceleração constante não-nula são utilizados para estimar parâmetros de TMA a partir de sinais captados por um VANT.

A revisão de literatura sobre o assunto indicou que não há referências que descrevam as especificações necessárias dos VANTs para a tarefa de estimação de parâmetros de TMA quando há somente um observador, como a velocidade que o VANT deve manter enquanto realiza as estimações ou a acurácia dos sistemas e sensores que estimam marcações. Portanto, o estudo serve para auxiliar na especificação de um VANT a ser utilizado para esse fim e qual desempenho pode ser esperado quando somente marcações de um único observador estão disponíveis para essa tarefa.

Para esse estudo são realizadas simulações utilizando a ferramenta Matlab[®] para obter resultados iniciais sobre o desempenho das estimações de parâmetros de TMA que os VANTs podem obter em um cenário tático naval.

4.1 CENÁRIO E O PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE ALVOS EM MOVIMENTO

Como os estimadores que devem ser utilizados para essa aplicação são modelados para alvos em movimento, um número maior de marcações é necessário. Inicialmente o número de marcações, N , será igual a 40, todas dentro de um intervalo de tempo, T , de 20 segundos. O cenário em que o desempenho dos algoritmos de estimação de parâmetros de TMA serão avaliados será um cenário tático naval onde é assumido que o observador e o alvo estejam no mesmo plano, ou seja, as simulações serão executadas em um plano cartesiano (em duas dimensões).

Os critérios de observabilidade para alvos em movimento implicam que o observador realize manobras. Para uma explicação mais abrangente sobre observabilidade de alvos em movimento o leitor poderá ser beneficiado com a leitura de (NARDONE, 1981).

Um cenário tático naval pode ser visto na Figura 4.1 (a) em que o observador está no início de um contato com um alvo. Considere que o observador dessa figura seja um VANT com um sensor passivo embarcado, típico de guerra eletrônica, capaz de estimar marcações a partir de sinais eletromagnéticos, por exemplo. Note que a geometria de

TMA apresentada torna o alvo não-observável e observe também que as marcações não estão ilustradas nessa figura, denotando assim que ainda não há marcações disponíveis.

Na Figura 4.1 (b) estão ilustrados o mesmo observador e o mesmo alvo em um momento posterior ao da Figura 4.1 (a). Nesse momento as $N = 40$ marcações estão disponíveis. Contudo, mesmo com esse número ($N = 40$) de marcações disponíveis é possível perceber na Figura 4.1 (b) que (mesmo assumindo marcações isentas de ruído) existe uma infinidade de parâmetros que poderiam ser utilizados para estimar as posições do alvo, de forma que o alvo poderia assumir as posições localizadas nas interseções entre as marcações e as setas pretas que estão sobrepostas às marcações, por exemplo. Isso se deve ao fato do observador não ter realizado nenhuma manobra. Esse cenário pode acontecer devido à demora no processamento dos sinais coletados pelo sensor passivo no VANT. Esse é um fato que requer atenção; contudo, assumiremos nesse trabalho que o tempo que leva para realizar as estimações seja muito pequeno a ponto de que problemas como esses (o observador não realizar manobras por ainda não ter estimado marcações) possam ser desconsiderados.

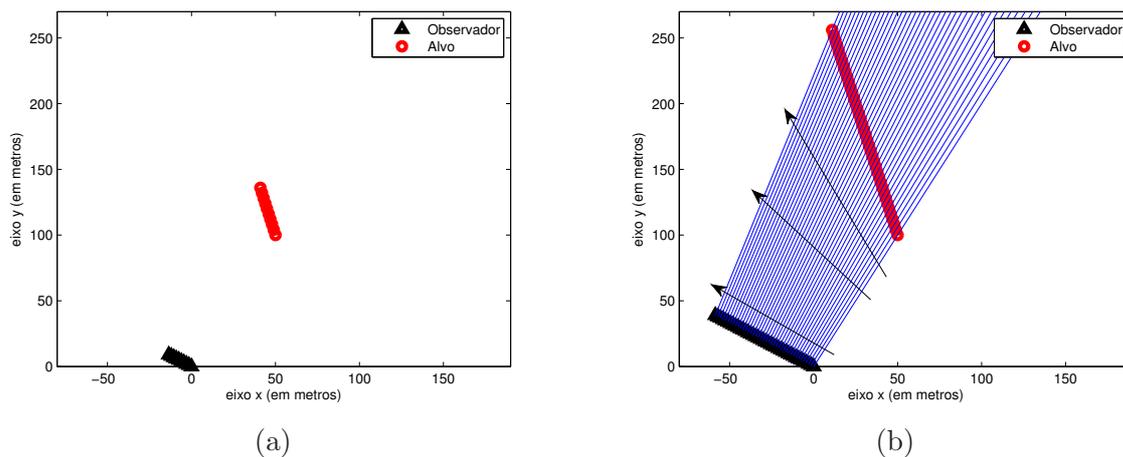


FIG. 4.1: (a) Exemplo do início de uma trajetória de um observador em um cenário tático naval. (b) O observador permaneceu com os mesmos parâmetros fazendo com que o alvo seja não observável.

Já nas Figura 4.2 (a) e (b) pode-se observar que os estimadores propostos nessa dissertação poderiam estimar um único vetor de parâmetros ξ devido à ocorrência de manobras durante a corrida do observador. Uma interpretação gráfica para o critério de observabilidade de alvos seria que no intervalo de observação os estimadores têm como pressuposto que não há mudanças nos parâmetros de TMA e, dessa forma, a realização de uma manobra reduz as possibilidades de valores que os parâmetros de TMA podem assumir. O

estimador pode então minimizar o erro de estimação dentro de um intervalo finito de possibilidades de valores para os parâmetros do vetor $\hat{\xi}$. Note que a realização de manobras reduz os pontos das possíveis posições que o alvo poderia assumir, como observado na Figura 4.2 (a) não seria possível que as posições estimadas ficassem localizadas sobre as setas pretas devido à mudança de rumo que o alvo deveria realizar. Na Figura 4.2 (b) fica ainda mais evidente que os parâmetros estimados não poderiam resultar em estimações das posições que fizessem uma interseção entre qualquer das duas setas pretas presentes na figura. Pode-se ainda inferir que, seguindo o pressuposto de que o alvo não mudou os seus parâmetros, o único espaço onde as localizações poderiam ser estimadas através dos parâmetros de TMA seria entre as duas setas presentes na Figura 4.2 (b). Ao contrário da Figura 4.1 (b) a utilização de um estimador de TMA com essas marcações isentas de ruído e as posições do observador, também isentas de ruído, resultaria em uma estimação não polarizada, ou seja, todas as posições do alvo poderiam ser estimadas sem erro de localização devido à ocorrência de manobras durante a trajetória do observador.

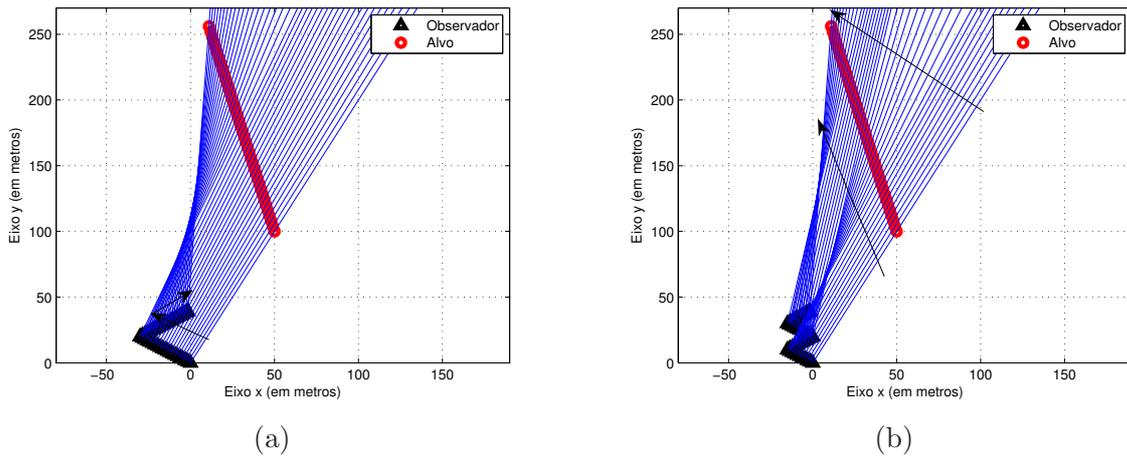


FIG. 4.2: (a) Exemplo de um alvo observável com um observador em uma corrida com duas pernas (b) Exemplo de um alvo observável com um observador em uma trajetória com quatro pernas.

Nas simulações, a seguir, os critérios de observabilidade serão respeitados, as marcações serão corrompidas por ruído Gaussiano $n_k \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$, portanto o desvio padrão é σ_n . Inicialmente os estimadores de parâmetros de alvos em movimento serão avaliados através da estimação da norma da polarização do estimador que é dada por

$$\text{polarização} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\mathbb{E}\{\hat{\xi}\} - \xi\|_2. \quad (4.1)$$

Na fase final do capítulo, os estimadores serão avaliados quanto à uma estimativa do erro médio de localização dado pela seguinte equação

$$\hat{d} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\hat{\mathbf{p}}_k - \mathbf{p}_k\|_2. \quad (4.2)$$

Note que, para alvos fixos, a aplicação das duas métricas resultam no mesmo valor, já que o vetor de parâmetros para o estimador de localização de alvos fixos é $\boldsymbol{\xi} = \{\mathbf{p}\}$.

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Uma avaliação qualitativa dos gráficos presentes nas Figuras 4.2 (a) e (b) indica que a geometria da Figura 4.2 (b) possivelmente resultará em melhores resultados devido à restrição dos valores que o vetor de parâmetros do alvo pode assumir. Portanto, ela será a trajetória que o VANT realizará inicialmente, que pode ser observada na Figura 4.2 (b). As posições assumidas pelo observador e pelo alvo são as ilustradas na Figura 4.3.

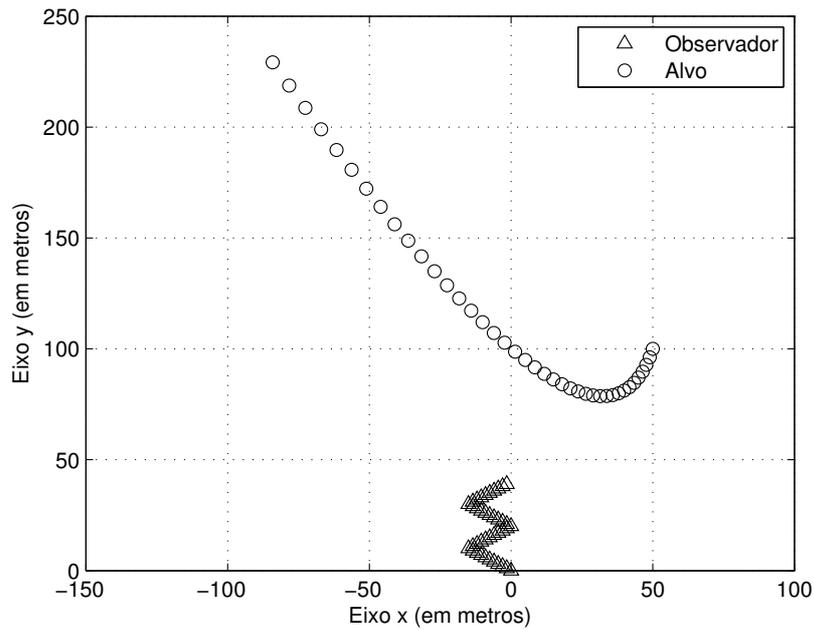


FIG. 4.3: Geometria de TMA com as posições do observador e do alvo no momento das estimações. Alvo com parâmetros $\mathbf{p}_0 = [50 \ 100]$, $\mathbf{v} = [-2 \ -8]$ e $\mathbf{a} = [-0.5 \ 1.5]$.

4.2.1 DESEMPENHO DOS MODELOS DE VELOCIDADE CONSTANTE E ACELERAÇÃO CONSTANTE

Em uma situação real de vigilância não se sabe que tipo de inimigo pode aparecer, tampouco os parâmetros que ele pode assumir. Com essa informação parece que a utilização de um modelo que realiza estimações do parâmetro aceleração seja a melhor escolha. Simulações foram realizadas para entender o desempenho dos dois modelos quando um alvo está em velocidade constante e outro alvo está com aceleração constante. Na Figura 4.4 (a) o alvo está com velocidade constante e aceleração nula; pode-se observar que os estimadores que utilizam o modelo de aceleração constante tiveram desempenho bem parecido com os estimadores que utilizam modelo de velocidade constante (denotado na legenda como $a = 0$). Já na Figura 4.4 (b) o alvo estava em aceleração constante $\mathbf{a} = [0.51.5]$, e nessas simulações, o desempenho do modelo de aceleração se mostrou superior. Portanto, como pode ser verificado nas Figuras 4.4 (a) e (b) o desempenho dos algoritmos com o modelo de aceleração constante é uma técnica mais robusta, portanto será o único modelo utilizado até o final da dissertação. O alvo terá seus parâmetros $\mathbf{p}_0 = [50100]$, $\mathbf{v} = [-2-8]$ e $\mathbf{a} = [-0.51.5]$. Contudo, quando se sabe *a priori* que o tipo de embarcação está em velocidade constante, como por exemplo navios cargueiros, pode-se tirar proveito da menor polarização do modelo de velocidade constante para conseguir melhores estimações. A polarização dos estimadores será medida utilizando a Equação 4.1.

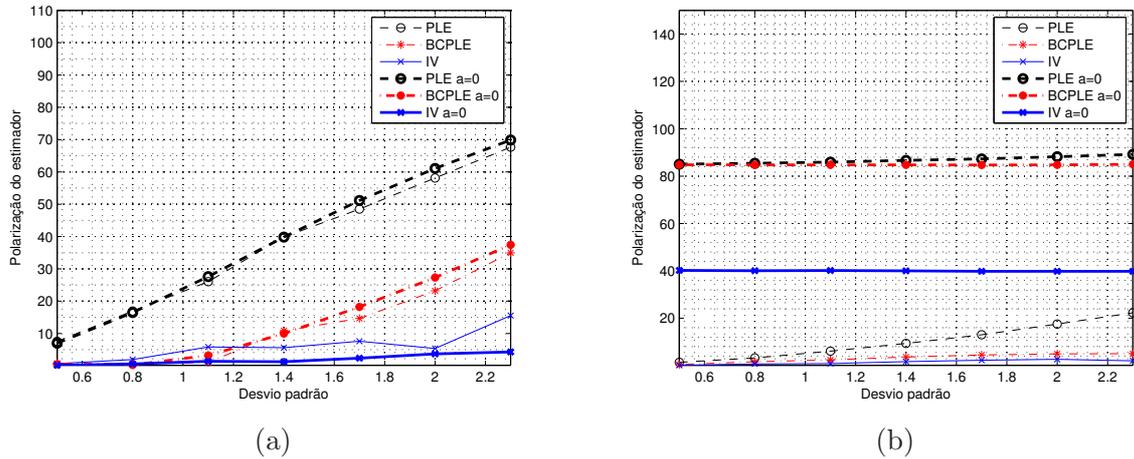


FIG. 4.4: Polarização dos estimadores versus desvio padrão do ruído das marcações (em graus) com $N = 40$. (a) Alvo em velocidade constante (b) Alvo com aceleração constante.

Na Figura 4.5 estão ilustradas as posições estimadas do alvo a partir dos vetores de

parâmetros estimados $\hat{\xi}_{PLE}$, $\hat{\xi}_{BCPLE}$ e $\hat{\xi}_{IV}$ utilizando os modelos de velocidade constante e aceleração constante com $\sigma_n = 1, 4$.

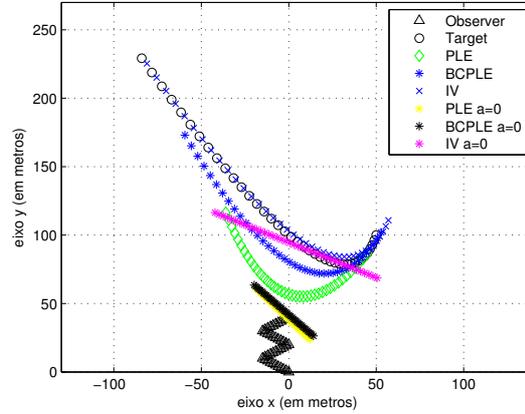


FIG. 4.5: Posições estimadas do alvo a partir do vetor de parâmetros estimado $\hat{\xi}$.

No início das simulações, foi escolhida uma trajetória com quatro pernadas porque inferiu-se que essa trajetória faria com que as estimações fossem menos polarizadas. Contudo, antes de iniciarmos os experimentos para saber o desempenho dos algoritmos em diferentes trajetórias (variando o ângulo das pernadas), podemos observar que de fato as quatro pernadas fizeram com que os estimadores fossem menos polarizados; os resultados para a trajetória com duas pernadas podem ser observados na Figura 4.6. Foi possível observar que quando o algoritmo BCPLÉ fica muito polarizado isso faz com que o IV tenha estimações ruins.

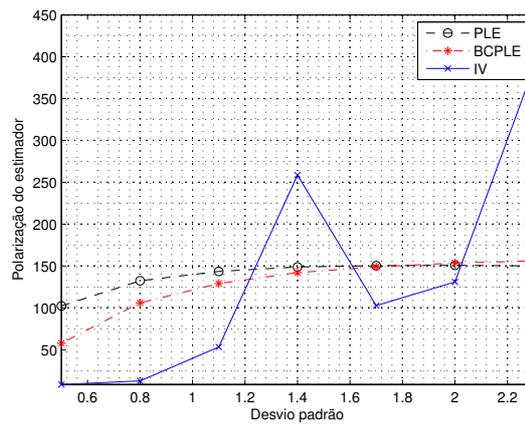


FIG. 4.6: Polarização dos estimadores versus desvio padrão do ruído das marcações (em graus) em uma trajetória com duas pernadas.

4.2.2 PAPEL DA TRAJETÓRIA NO DESEMPENHO DO ESTIMADOR

Podemos observar que, para um mesmo intervalo de tempo $T = 20$, a partir de uma primeira estimação de marcação do alvo o VANT (observador) pode efetuar inúmeros tipos de trajetória devido à sua mobilidade, como por exemplo nas Figuras 4.2. Já foi verificado que a polarização dos estimadores é menor quando o observador realiza a trajetória com quatro pernadas. Agora o desempenho dos estimadores de TMA serão avaliados com a mudança da orientação de cada pernada, o rumo de cada pernada.

Conforme pode ser visto na Figura 4.7, o ângulo zero representa o rumo do observador paralelo ao eixo y , 90° representa o rumo paralelo ao eixo x (crescente) e o ângulo -90° representa o rumo paralelo ao eixo x (decréscante). Para cada ângulo θ escolhido, a trajetória se dará da primeira pernada até a quarta pernada com os rumos assumindo os seguintes ângulos $-\theta, \theta, -\theta, \theta$, formando um “zig-zag”.

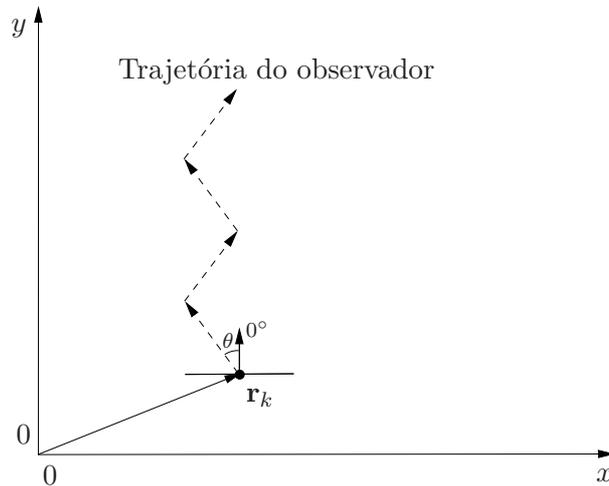


FIG. 4.7: Trajetória do observador e o ângulo θ de cada pernada.

Conforme pode ser visto na Figura 4.8, para ângulos menores que 40° pode ser notado um aumento da polarização dos estimadores. Até chegar a 10° , esse ângulo faz com que a polarização dos estimadores cresça muito, isso se deve ao fato de que, no ângulo 0° , o alvo se torna não-observável e, conforme podemos observar na Figura 4.8, quanto mais próximo do ângulo 0° mais polarizado serão os estimadores. Como o ângulo escolhido inicialmente $\theta = 56,3099^\circ$, $\mathbf{v} = [3, 2]$ não afeta negativamente no desempenho do estimador, portanto esse ângulo será mantido.

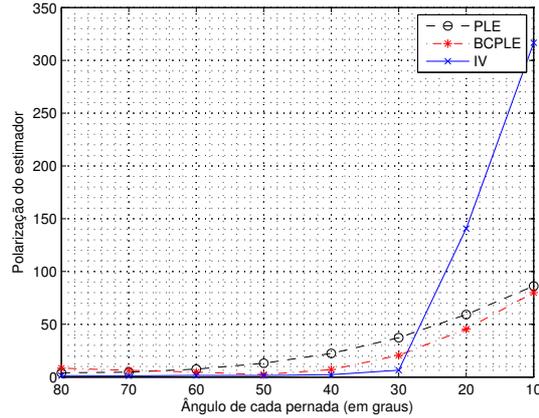


FIG. 4.8: Polarização dos estimadores versus ângulo das pernadas (em graus) em uma trajetória com quatro pernadas.

4.2.3 DISTÂNCIA ENTRE OBSERVADOR E ALVO

Pode-se notar na Figura 4.9 que conforme a distância aumenta a polarização dos estimadores também aumenta. A geometria inicial é a mesma adotada até agora. São rodados 1000 simulações independentes para cada posição inicial do alvo. A posição inicial do alvo $\mathbf{p}_0 = [50100]$ e a distância é aumentada de 100 em 100 em sua coordenada y até que a última posição inicial do alvo $\mathbf{p}_0 = [50600]$. Pode ser notado que o fator mais relevante até o momento para afetar negativamente as estimações é o aumento da distância. Portanto, nos próximos experimentos será avaliada se a variável velocidade pode fazer com que a polarização dos estimadores seja reduzida.

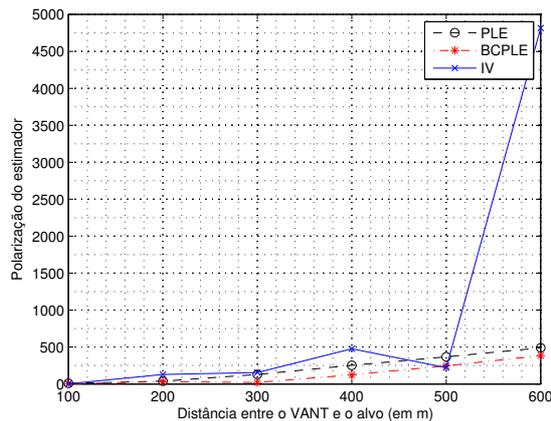


FIG. 4.9: Polarização dos estimadores versus distância do VANT (em m).

4.2.4 VELOCIDADE DO OBSERVADOR

A velocidade do VANT inicialmente era de 7,2 m/s (25,92 km/h). Ao aumentarmos a velocidade do VANT, os pontos de observação se distanciam e isso faz com que a polarização diminua, conforme pode ser visto nas Figuras 4.10. As velocidades utilizadas são: 5, 10, 15, 20, 25, 30 m/s. Observa-se que essas velocidades fazem com que o estimador possa realizar estimações razoáveis a partir de 15 m/s (54 km/h). Contudo, se a distância aumentar essas estimações iriam se degradar novamente. Portanto, iremos examinar a seguir outra variável, a taxa de estimações N , realizadas nesse intervalo de tempo, T .

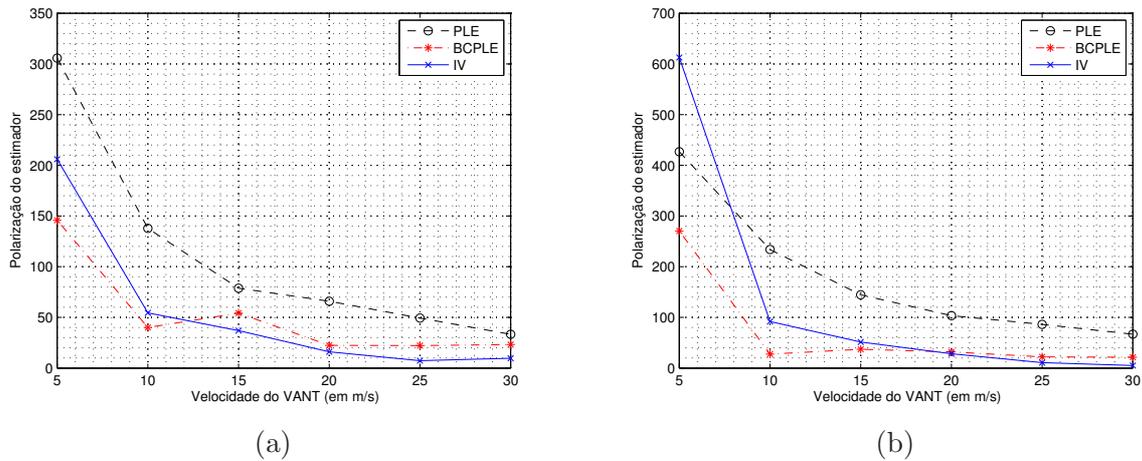


FIG. 4.10: Polarização dos estimadores versus velocidade (em m/s). (a) Alvo com posição inicial em [50 500] (b) Alvo com posição inicial em [50 600].

4.2.5 TAXA DE MARCAÇÕES NECESSÁRIA

Com os experimento com diversas velocidades do VANT foi observado que a velocidade de 30 m/s foi a que mais contribuiu para a diminuição da polarização dos estimadores, portanto a partir de agora a velocidade do VANT será de 30 m/s (108 km/h). Os experimentos serão realizados para a posição do alvo $\mathbf{p}_0 = [50500]$ e $\mathbf{p}_0 = [50600]$. Fixamos essa velocidade e aumentamos a quantidade de marcações estimadas nessa trajetória. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.11.

Como pode ser observado a polarização do IV decai conforme o número de marcações disponíveis aumenta. O mesmo não acontece com o PLE que tem polarização bem alta.

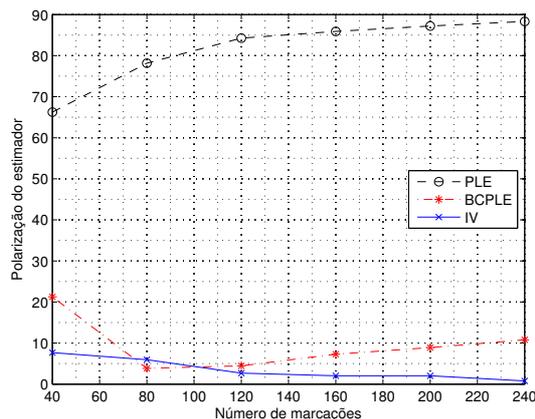


FIG. 4.11: Polarização dos estimadores versus número de marcações.

4.2.6 SENSORIAMENTO EM UM CENÁRIO TÁTICO NAVAL

Em um cenário tático naval as distâncias entre observador e alvo podem ser muito maiores, portanto, permita que marcações estejam sendo estimadas de um alvo a 5.000 metros de distância. Para processar as marcações nesse cenário serão utilizadas as variáveis que reduziram a polarização dos estimadores. Para essa distância outra variável teve que ser alterada, o desvio padrão σ_n . Devido à distância entre o alvo e o observador notou-se que, para obter estimações razoáveis, o erro das estimações das marcações deveria ser menor. Na Figura 4.12 pode ser observado que o desvio padrão começa em 0,1 e termina em 0,6. Pode ser observado que o erro médio das N estimações começa com 111 metros e termina com 790 metros para o IV.

O tempo de observação continua inalterado $T = 20$, o número de marcações durante esse tempo foi $N = 240$, o ângulo para o rumo das pernadas foi $\theta = 56,3099^\circ$ e $-\theta = 56,3099^\circ$, a velocidade foi de 30 m/s.

4.3 DISCUSSÃO

A utilização de VANTs pode ser útil como meio para aumentar a área de vigilância utilizando sensores passivos. Existe uma miríade de variáveis com que se preocupar quando se quer executar o processamento das marcações obtidas com sensores passivos embarcados em um VANT. Inicialmente, deve-se ter atenção para o tempo de estimação requerido para executar as estimações de marcações uma vez que durante o tempo de observação o observador deve executar manobras para que seja possível ter um alvo observável. O

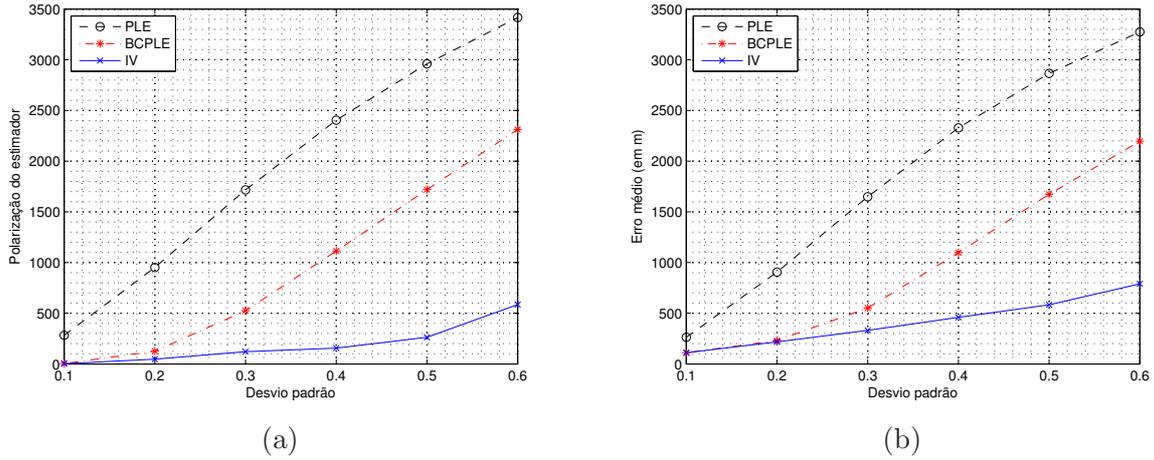


FIG. 4.12: Polarização dos estimadores versus desvio padrão. (a) Polarização (b) Erro médio das N estimações.

número de manobras executadas é um ponto em que se pode otimizar o desempenho dos observadores. O tipo de manobra executada pode fazer com que o alvo seja não observável e até fazer com que os erros sejam minimizados, portanto o tempo em que são realizadas a detecção de um alvo e as primeiras estimações é um ponto chave para que o operador do VANT possa efetuar as manobras necessárias. Nesse trabalho, foram comparadas trajetórias, uma com duas pernadas e outra com quatro. Os resultado das simulações indicam que um número maior de pernadas pode reduzir a polarização dos estimadores.

O rumo de cada pernada pode também otimizar o desempenho dos estimadores: foi observado nas simulações que os ângulos mais agudos (fazendo com que a trajetória quase torne o alvo não-observável) afeta negativamente o desempenho dos estimadores. Os ângulos menores que 40 graus aumentam a polarização dos estimadores.

Em seguida, foi demonstrado que a distância é um dos fatores que mais pode degradar o desempenho dos estimadores. Isto pode estar relacionado ao fato de que, conforme a distância aumenta, o erro de estimação entre a marcação e a posição real do alvo (um vetor entre a marcação e a posição real do alvo, ortogonal à marcação) também aumenta.

A velocidade do observador pode melhorar o desempenho dos estimadores, quanto maior a velocidade menos polarizado o estimador fica. O ajuste da velocidade fez com que a polarização dos estimadores ficassem baixas mesmo distâncias mais elevadas. Contudo, a taxa de marcações necessárias foram também avaliadas na tentativa de melhorar ainda mais a polarização dos estimadores. Taxas de marcações mais altas fazem com que

os estimadores apresentem melhores estimações, o algoritmo que mais se destacou foi o estimador de variáveis instrumentais (IV).

A partir desses dados é possível obter as especificações de um VANT que possa realizar vigilância e obter resultados razoáveis com técnicas de BO-TMA. Foi analisado o caso em que um VANT está afastado a 5.000 metros do observador. Nesse cenário as variáveis foram ajustadas na tentativa de minimizar a polarização dos estimadores. Foi constatado que o dispositivo que determina a direção do alvo deveria ter erro menor para obter estimativas razoáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo estão resumidas as principais contribuições e são sugeridos tópicos que podem ser explorados em futuras pesquisas.

5.1 CONCLUSÕES

A utilização de veículos aéreos não tripulados está se tornando cada vez mais comum nas Forças Armadas e Forças Auxiliares. A preferência pela utilização desses meios é natural devido ao baixo custo associado e pelos grandes benefícios gerados, tais como: não colocar vidas humanas em risco e realizar vigilância de grandes áreas rapidamente.

Essa dissertação abordou duas aplicações de interesse para vigilância utilizando VANTs: a primeira é o processamento de marcações estimadas por um quadricóptero para estimar a posição de um alvo fixo, um atirador; a segunda aplicação é o processamento de marcações, estimadas através de sensores passivos embarcados em um VANT, para estimar parâmetros de um alvo em movimento, por exemplo uma possível ameaça em território marítimo nacional.

Inicialmente a estimação do atirador foi realizada através de sinais de tiro sintetizados. Esses sinais foram sintetizados para diferentes posições do observador, simulando o deslocamento do VANT durante o período de observação. Com diferentes sinais coletados em diferentes posições, é possível utilizar técnicas de BO-TMA para estimar a posição do atirador. Os sinais de tiro foram corrompidos pelo ruído produzido pelo VANT a uma SNR apropriada, conforme a distância entre o observador e o alvo, o que tornou os resultados do simulador próximos aos de uma situação real.

Com bons resultados para a estimação de um atirador em um ambiente simulado, foi realizada uma coleta de sinais reais com o observador em diferentes posições, isso tornou possível utilizar técnicas de BO-TMA para estimar a posição do atirador. Para coletar os sinais em campo foi utilizado um arranjo de microfones embarcado em um quadricóptero e uma geometria que tornasse possível utilizar as mesmas técnicas de BO-TMA e assim validar os resultados obtidos em simulações.

A componente acústica do sinal de tiro utilizada para estimar a direção do atirador (*muzzle blast*) é altamente corrompida com o ruído produzido pelas hélices do quadricóptero,

portanto técnicas de melhoramento de sinal foram avaliadas: a subtração espectral e o filtro de mediana. O filtro de mediana pareceu ser uma técnica promissora para melhorar os sinais de tiro corrompidos com o ruído gerado pelo VANT; entretanto, ao elevar-se a distância VANT-atirador, a utilização do sinal sem pré-processamento com as técnicas de estimação de DoA obteve resultados mais robustos.

As técnicas de BO-TMA para alvos fixos, LS e TLS, foram comparadas utilizando as marcações estimadas através de sinais de tiro sintetizados. O TLS apresentou melhores resultados para estimar a posição do atirador.

Para a estimação de parâmetros de alvos em movimento (posição inicial, velocidade e aceleração), foram comparados três algoritmos de BO-TMA com modelos de estimação para alvos em velocidade constante e alvos com aceleração constante. Foi observado que, para o contexto de vigilância, como não se sabe *a priori* que tipo de alvo pode adentrar no território nacional (no caso de cenário de vigilância marítima), o modelo de aceleração constante mostrou ser mais robusto, ou seja, o modelo de aceleração constante obteve resultados para alvos com velocidade constante bem parecidos com o modelo de velocidade constante. Por outro lado, quando o alvo está com aceleração constante, os resultados do modelo de velocidade constante ficam bem degradados.

Os modelos de aceleração constante foram utilizados para realizar as simulações e obter especificações de um VANT para realizar boas estimações utilizando somente marcações. Foi observado que, para cobrir a maior área possível com sensoriamento passivo, o VANT deve ter alta taxa de marcações e que altas velocidades possibilitam melhores estimações. Foi ainda observado que a utilização de manobras é fator primordial para possibilitar a estimação de parâmetros e que um número maior de pernadas tornam as estimações menos polarizadas. Entre duas e quatro pernadas houve uma diminuição significativa da polarização dos estimadores. As pernadas foram retilíneas e foi demonstrado que ângulos maiores que 40° tornam os estimadores mais polarizados, até chegar a 0° quando a trajetória torna o alvo não-observável. As estimações são altamente dependentes da acurácia do estimador das marcações. Portanto, para se empregar VANTs para o sensoriamento passivo essas variáveis devem ser cuidadosamente avaliadas já que são fatores que podem minimizar a polarização dos estimadores.

5.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A coleta de sinais com o quadricóptero foi realizada com o VANT pairando (*hovering*) sobre locais previamente demarcados. Isso se deve à dificuldade de se obter as coordenadas e atitude do quadricóptero e, ainda, ter esses dados sincronizados aos sinais acústicos. A aquisição e sincronização desses dados aos sinais acústicos é um tópico importante a ser estudado e implementado. Com esses dados, seria possível coletar os sinais com o quadricóptero em movimento. Entretanto, se o alvo emitir componentes harmônicos, o efeito *Doppler* vai ser detectado no observador. Nesse caso, as medidas das frequências podem ser exploradas para melhorar a estimação. A utilização do efeito *Doppler* e das marcações (HO, 2006) é denominada *Doppler-bearing* TMA (DB-TMA). Essa técnica é especialmente vantajosa quando o alvo está em movimento já que as medidas do efeito *Doppler* permitem que os parâmetros sejam estimados sem a necessidade de manobras do observador (HO, 2006).

A montagem de um arranjo de microfones na base do quadricóptero em um aparato que garantisse estabilidade, como acontece com as câmeras que são embutidas no modelo Phantom (modelo conhecido por produzir imagens em alta definição e estáveis), seria uma forma de garantir que a atitude se mantivesse durante todo o vôo do quadricóptero. Dessa forma, não seriam necessários dados sobre a atitude do VANT.

Na coleta de dados em campo, o quadricóptero não transmitiu os dados por um enlace sem fio. Portanto, finalmente, coletar os sinais acústicos e enviá-los através de um enlace sem fio poderia fazer com que um drone pudesse ser utilizado em situações reais de fogo cruzado.

Os resultados da estimação de marcações com sinais de tiros reais utilizando a busca exaustiva $ES(n)$ com o número n de pares de microfones variando conforme a SNR oferece melhores resultados. Portanto, estudar a geometria do arranjo a ser utilizado em um VANT e calibrá-lo para utilizar o algoritmo de busca exaustiva – buscando *loop* fundamental consistente (do inglês *Exhaustive Search – Searching Consistent Fundamental Loop*, ES-SCFL) pode melhorar a acurácia da estimação das marcações.

O método proposto para a estimação da posição de um atirador fixo poderia ser empregado para estimar outros tipos de sinais impulsivos, como por exemplo a explosão de um projétil. Para esse fim, arranjos de microfones geograficamente distribuídos (de forma que o ponto de impacto possa ser observável) poderiam ser utilizados. Outra

abordagem para essa aplicação, assumindo que a explosão ocorra no solo, seria a utilização do VANT como uma plataforma elevada para estimar a direção de chegada do sinal acústico da explosão e sua localização através da interseção da marcação estimada com o solo (PAREDES-CALDERON, 2015).

As técnicas para realizar a estimação de parâmetros de um alvo em movimento nesse trabalho possui limitações para a utilização em um ambiente real, especialmente pela falta de um sistema para detecção de eventuais manobras que o alvo efetue. Isso quer dizer que, dado um conjunto de marcações obtidas em um cenário real, as estimações podem ser afetadas se, nos instantes em que as marcações são obtidas, o alvo tenha mudado radicalmente os seus parâmetros. A utilização de técnicas de detecção de realização de manobras como as presentes em (ZHANG, 2013; NORTHARDT, 2014) aliada aos estimadores que foram estudados nessa dissertação poderiam gerar um sistema mais robusto para realizar as estimações.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, J. R. Gunshot detection systems in civilian law enforcement. *Journal of the Audio Engineering Society*, 63(4):280–291, 2015.
- ALEXANDRI, T. e DIAMANT, R. A reverse bearings only target motion analysis (BO-TMA) for improving AUV navigation accuracy. Em *Positioning, Navigation and Communications (WPNC), 2016 13th Workshop on*, págs. 1–5. IEEE, 2016.
- ALVAREZ, H., PAZ, L., STURM, J. e CREMERS, D. Collision avoidance for quadrotors with a monocular camera. Em *Experimental Robotics*, págs. 195–209. Springer, 2016.
- BADRIASL, L. e DOGANCAI, K. Three-dimensional target motion analysis using azimuth/elevation angles. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 50(4):3178–3194, 2014.
- BEROUTI, M., SCHWARTZ, R. e MAKHOUL, J. Enhancement of speech corrupted by acoustic noise. Em *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'79.*, volume 4, págs. 208–211. IEEE, 1979.
- BORZINO, A. M. C. R., APOLINÁRIO JR., J. A., DE CAMPOS, M. L. R. e BISCAIHO, L. W. P. Signal enhancement for gunshot DOA estimation with median filters. Em *Circuits & Systems (LASCAS), 2015 IEEE 6th Latin American Symposium on*, págs. 1–4. IEEE, 2015a.
- BORZINO, A. M. C. R., APOLINÁRIO JR., J. A. e DE CAMPOS, M. L. R. Estimating direction of arrival of long range gunshot signals. Em *Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International*, págs. 1–5. IEEE, 2014.
- BORZINO, A. M. C. R., APOLINÁRIO JR., J. A. e DE CAMPOS, M. L. R. Robust DOA estimation of heavily noisy gunshot signals. Em *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015 IEEE International Conference on*, págs. 449–453. IEEE, 2015b.
- BORZINO, A. M. C. R., APOLINÁRIO JR., J. A. e DE CAMPOS, M. L. R. Consistent DOA estimation of heavily noisy gunshot signals using a microphone array. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 10:1519–1527, December 2016.
- CH, S. S., LOVA RAJU, K., RAO, K. e OTHERS. Evaluation of passive target tracking algorithms. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6, january 2015.
- COHEN, C. Entering bearing rates into bearings only target motion analysis. Technical report, DTIC Document, 1964.
- CORRÊA, H. Amazônia azul, pré-sal, soberania e jurisdição marítima. *Revista do Centro de Estudos Jurídicos*, 2010.

- DARPA-NAVY. Darpa-navy agreement to develop tern concept. DARPA, November 2014. Disponível em: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-06-11/> Acesso em: abr. 2017.
- DARPA-NAVY. Service academies swarm challenge live-fly competition begins. DARPA, Abril 2017. Disponível em: <http://www.darpa.mil/news-events/2017-04-23/> Acesso em: abr. 2017.
- DINIZ, P. S. *Adaptive filtering*. Springer, 1997.
- DOĞANÇAY, K. Bearings-only target localization using Total Least Squares. *Signal Processing*, 85(9):1695–1710, 2005a.
- DOĞANÇAY, K. On the efficiency of a bearings-only instrumental variable estimator for target motion analysis. *Signal processing*, 85(3):481–490, 2005b.
- DOĞANÇAY, K. Bias compensation for the bearings-only pseudolinear target track estimator. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54(1):59–68, 2006.
- DOHERTY, P. e RUDOL, P. A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization. Em *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence*, págs. 1–13. Springer, 2007.
- EVANS, N. W., MASON, J. S., LIU, W. M. e FAUVE, B. An assessment on the fundamental limitations of spectral subtraction. Em *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on*, volume 1, págs. I–I. IEEE, 2006.
- FERNANDES, R. P., BORZINO, A. M. C. R., RAMOS, A. L. L. e APOLINÁRIO JR., J. A. Investigating the potential of UAV for gunshot DoA estimation and shooter localization. Em *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, págs. 383–387. SBrT, 2016.
- FERNANDES, R. P., RAMOS, A. L. L. e JR., J. A. A. Airborne DoA estimation of gunshot acoustic signals using drones with application to sniper localization systems. Em *SPIE Defense, Security, and Sensing*, volume 10184, págs. 101840F–101840F–7. International Society for Optics and Photonics, 2017a.
- FERNANDES, R. P. e APOLINÁRIO JR., JOSÉ A, R. A. L. L. Bearings-only aerial shooter localization using a microphone array mounted on a drone. Em *Proceedings of The 8th Latin American Symposium*. Latin American Symposium on Circuits and Systems. LASCAS, 2017b.
- FERNANDES, R. P., SANTOS, E. C., RAMOS, A. L. L. e APOLINÁRIO JR., J. A. A first approach to signal enhancement for quadcopters using piezoelectric sensors. Em *Proceedings of The 20th International Conference on Transformative Science and Engineering, Business and Social Innovation*, págs. 536–541. Society For Design And Process Science. SDPS, 2015.

- FITZGERALD, D. (2010) Harmonic/percussive separation using median filtering. Em *13th International Conference on Digital Audio Effects (DAFX10)*, Graz, Austria, 2010.
- FREIRE, I. L., PRANDEL, P. C. e APOLINÁRIO JR., J. A. Sobre a escolha de sinais em arranjos de microfones estimando doa com GCC-PHAT. *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2012.
- FREIRE, I. L. Robust direction-of-arrival by matched-lags, applied to gunshots. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(6):EL246–EL251, 2014.
- FREIRE, I. L. e APOLINÁRIO JR, J. Localização de atirador por arranjo de microfones. volume X, págs. 1049–1053. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. SBAI, September 2011.
- GALLAGHER JR, N. C. e WISE, G. L. A theoretical analysis of the properties of median filters. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 29(6):1136–1141, 1981.
- GU, G. A novel power-bearing approach and asymptotically optimum estimator for target motion analysis. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 59(3):912–922, 2011.
- GUPTA, R., KUMAR, A., KAR, I. e BAHL, R. Bearings-only tracking of non-maneuvering target with missing bearings data. Em *Underwater Technology (UT), 2015 IEEE*, págs. 1–7. IEEE, 2015.
- HO, K. e CHAN, Y.-T. An asymptotically unbiased estimator for bearings-only and doppler-bearing target motion analysis. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 54(3):809–822, 2006.
- HRABINA, M. e SIGMUND, M. Acoustical detection of gunshots. Em *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2015 25th International Conference*, págs. 150–153, April 2015.
- KNAPP, C. H. e CARTER, G. C. The generalized correlation method for estimation of time delay. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 24(4):320–327, 1976.
- KRONHAMN, T. Bearings-only target motion analysis based on a multihypothesis kalman filter and adaptive ownship motion control. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 145(4):247–252, 1998.
- LINGREN, A. G. e GONG, K. F. Position and velocity estimation via bearing observations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (4):564–577, 1978.
- LUO, Y., SALLAI, J. e LEDECZI, A. A hough transform based approach to acoustic shot localization. Em *Information Fusion (FUSION), 2016 19th International Conference on*, págs. 1420–1426. IEEE, 2016.
- MAO, S., TAN, W. K. e LOW, K. H. Autonomous formation flight of indoor uavs based on model predictive control. Em *AIAA Infotech@ Aerospace*, pag. 0515. 2016.

- MAZUREK, J. A., BARGER, J. E., BRINN, M., MULLEN, R. J., PRICE, D., RITTER, S. E. e SCHMITT, D. Boomerang mobile counter shooter detection system. Em *Defense and Security*, págs. 264–282. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- MEYER, J. e SIMMER, K. U. Multi-channel speech enhancement in a car environment using wiener filtering and spectral subtraction. Em *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. ICASSP-97., 1997 IEEE International Conference on*, volume 2, págs. 1167–1170. IEEE, 1997.
- MIZUMACHI, M. e AKAGI, M. Noise reduction by paired-microphones using spectral subtraction. Em *Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on*, volume 2, págs. 1001–1004. IEEE, 1998.
- NARDONE, S., LINDGREN, A. e GONG, K. Fundamental properties and performance of conventional bearings-only target motion analysis. *IEEE Transactions on automatic control*, 29(9):775–787, 1984.
- NARDONE, S. C. e AIDALA, V. J. Observability criteria for bearings-only target motion analysis. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, (2):162–166, 1981.
- NARDONE, S. C. e GRAHAM, M. L. A closed-form solution to bearings-only target motion analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(1):168–178, 1997.
- NORTHARDT, E. T., BILIK, I. e ABRAMOVICH, Y. Bearings-only constant velocity target maneuver detection via expected likelihood. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 50(4):2974–2988, 2014.
- OKUTANI, K., YOSHIDA, T., NAKAMURA, K. e NAKADAI, K. Outdoor auditory scene analysis using a moving microphone array embedded in a quadrocopter. Em *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, págs. 3288–3293. IEEE, 2012.
- PAREDES CALDERON, D. M. e APOLINARIO, J. A. Shooter localization based on DoA estimation of gunshot signals and digital map information. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 13(2):441–447, 2015.
- PAREDES-CALDERON, D. M. e APOLINÁRIO JR., J. A. Shooter localization based on DoA estimation of gunshot signals and digital map information. *IEEE Latin America Transactions*, 13(2):441–447, Feb 2015. ISSN 1548-0992.
- PONDA, S. S., KOLACINSKI, R. M. e FRAZZOLI, E. Trajectory optimization for target localization using small unmanned aerial vehicles. Em *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois, USA*, págs. 10–13, 2009.
- QI, J., SONG, D., SHANG, H., WANG, N., HUA, C., WU, C., QI, X. e HAN, J. Search and rescue rotary-wing UAV and its application to the lushan ms 7.0 earthquake. *Journal of Field Robotics*, 2015.
- RAMOS, A. L. L. *Acoustic Sniper Positioning Systems*. Tese de Doutorado, University of Oslo, 2015.

- RAMOS, A. L. L., HOLM, S., GUDVANGEN, S. e OTTERLEI, R. The multipath propagation effect in gunshot acoustics and its impact on the design of sniper positioning systems. Em *Proc. SPIE, Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense XII*, volume 8711, pág. 87110A, June 2013.
- REIFF, C., PHAM, T., SCANLON, M., NOBLE, J., LANDUYT, A. V., PETEK, J. e RATCHES, J. Acoustic detection from aerial balloon platform. Technical report, DTIC Document, 2004.
- RISTIC, B., ARULAMPALAM, S. e MCCARTHY, J. Target motion analysis using range-only measurements: algorithms, performance and application to ISAR data. *Signal Processing*, 82(2):273–296, 2002.
- SAMAD, A. M., KAMARULZAMAN, N., HAMDANI, M. A., MASTOR, T. A. e HASHIM, K. A. The potential of unmanned aerial vehicle (uav) for civilian and mapping application. Em *System Engineering and Technology (ICSET), 2013 IEEE 3rd International Conference on*, págs. 313–318. IEEE, 2013.
- SAYED, A. H. *Fundamentals of adaptive filtering*. John Wiley & Sons, 2003.
- SCHMIDT, R. O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34(3):276–280, 1986.
- SCHRAM, K. W. *Vision-based control and autonomous landing of a VTOL-UAV*. Tese de Doutorado, Lakehead University, 2014.
- SHENG, X. e HU, Y.-H. Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 53(1):44–53, 2005.
- SPEZIO, A. E. Electronic warfare systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3):633–644, 2002.
- STACY, N., CRAIG, D., STAROMLYNSKA, J. e SMITH, R. The global hawk uav australian deployment: imaging radar sensor modifications and employment for maritime surveillance. Em *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International*, volume 2, págs. 699–701. IEEE, 2002.
- STANSFIELD, R. Statistical theory of d.f. fixing. *Electrical Engineers-Part IIIA: Radio-communication, Journal of the Institution of*, 94(15):762–770, 1947.
- SUOJANEN, M., KUIKKA, V., NIKKARILA, J.-P. e NURMI, J. An example of scenario-based evaluation of military capability areas an impact assessment of alternative systems on operations. Em *Systems Conference (SysCon), 2015 9th Annual IEEE International*, págs. 601–607. IEEE, 2015.
- SZENDRODI, C. E. C. Análise do movimento de veículos utilizando técnicas de inteligência artificial. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

- TOSANGUAN, T., DICKINSON, R. J. e DRAKAKIS, E. M. Modified spectral subtraction for de-noising heart sounds: Interference suppression via spectral comparison. Em *Biomedical Circuits and Systems Conference, 2008. BioCAS 2008. IEEE*, págs. 29–32. IEEE, 2008.
- TREES, H. L. *Detection, estimation, and modulation theory part iv*. John Wiley & Sons, 2004.
- WELCH, P. D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2):70–73, 1967.
- WU, L. e QIU, X. Active impulsive noise control algorithm with post adaptive filter coefficient filtering. *Signal Processing, IET*, 7(6):515–521, 2013.
- YOON, S., PARK, S., EOM, Y. e YOO, S. Advanced sound capturing method with adaptive noise reduction system for broadcasting multicopters. Em *Consumer Electronics (ICCE), 2015 IEEE International Conference on*, págs. 26–29. IEEE, 2015.
- YOUSHENG, X. e JIANWEN, H. Speech enhancement based on combination of wiener filter and subspace filter. Em *Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2014 International Conference on*, págs. 459–463. IEEE, 2014.
- ZHANG, Q. e SONG, T. L. Improved bearings-only target tracking with iterated gaussian mixture measurements. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016.
- ZHANG, Y. J. e GENG, Z. Detection of target maneuver from bearings-only measurements. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 49(3):2028–2034, 2013.
- ZHANG, Y. J. e XU, G. Z. Bearings-only target motion analysis via instrumental variable estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(11):5523–5533, 2010.