

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA ENGAJAMENTO DE MÍSSEIS INFRAVERMELHOS

SIMULATION METHODOLOGY OF INFRARED MISSILES ENGAGEMENTS

O Cap Av Caio Augusto de Melo Silvestre concluiu o CFO em 2011. Em 2014, realizou o Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Em 2018, concluiu o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO) no ITA. Atualmente é Adjunto da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento no Instituto de Aplicações Operacionais (IAOp).

Contato: caio.silvestre.1990@gmail.com



O Cel Av Lester de Abreu Faria concluiu o CFO em 1993. Possui graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Eletrônica (2004, 2010 e 2014), todos pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Professor Credenciado nos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação (PG-EEC) e de Ciências e Tecnologias Aeroespaciais (PG-CTE) do ITA.

Contato: lester@ita.br



RESUMO

O crescente desenvolvimento tecnológico da Força Aérea Brasileira (FAB) demanda, cada vez mais, o desenvolvimento de técnicas que permitam a avaliação e predição do desempenho de sistemas complexos. Neste contexto, o presente trabalho propõe um modelo de simulação para engajamentos de mísseis infravermelhos, empregando-se um cenário virtual cujas características correspondem a parâmetros radiométricos. Como estudo de caso, apresenta-se o modelamento da assinatura infravermelha de uma aeronave Boeing 737, em múltiplas bandas de interesse do espectro infravermelho. Além disso, modelamentos de autodiretores de 1ª, 2ª e 3ª gerações foram estudados e apresentados. Por fim, processos de integração do cenário em realidade virtual com a dinâmica do míssil e com as contramedidas infravermelhas foram descritos.

Palavras-Chave: Guerra Eletrônica, mísseis infravermelhos, Simulação, Realidade Virtual.

ABSTRACT

The increasing technological development of the Brazilian Air Force (FAB) demands, increasingly, the development of techniques that allow the evaluation and prediction of the performance of complex systems. In this context, the present work proposes a simulation model for infrared missile engagements, using a virtual scenario whose characteristics correspond to radiometric parameters. As a case study, the infrared signature model of a Boeing 737 aircraft is presented in multiple bands of interest, in the infrared spectrum. In addition, 1st, 2nd and 3rd generation seekers models have been studied and presented. Finally, processes of integrating the virtual reality scenario with the missile dynamics and infrared countermeasures were described.

Keywords: Electronic Warfare, Infrared Missiles, Simulation, Virtual Reality.

I – INTRODUÇÃO

Mísseis guiados por radiação infravermelha começaram a ser utilizados em operações militares na década de 60, sendo, desde então, considerados como uma tecnologia de armamento antiaéreo extremamente bem-sucedido. Dados indicam que dentre todas as aeronaves abatidas por antiaérea, mais de 60% o foram por mísseis infravermelhos, dos quais fazem os mísseis de ombro (MANPADS) [1]. A relativa simplicidade deste tipo de armas guiadas levou a uma grande proliferação no mundo, chegando a ser considerada, mais recentemente, como a arma preferida de forças não-convencionais [2].

Com o aumento deste tipo de ameaça no mundo, ressalta-se a necessidade de desenvolver capacidade para se modelar e simular cenários infravermelhos com alta fidelidade e baixo custo, os quais possam ser utilizados no desenvolvimento e análise de contramedidas, bem como no desenvolvimento de técnicas de evasiva.

O processo de avaliação, treinamento e teste de mísseis infravermelhos, e suas contramedidas, possui custos financeiro e logístico relativamente altos. Em contrapartida, simulações computacionais podem prover alternativas mais acessíveis financeiramente do que os testes de campo, dependendo dos objetivos a serem alcançados [3].

Para se avaliar, por meio de simulação, a efetividade de uma contramedida, faz-se necessário conhecer a performance do míssil em questão. Da mesma forma, se o objetivo é a avaliar o desempenho de um míssil contra um alvo real, se faz necessário conhecer as peculiaridades deste. Assim, pode-se afirmar que o processo de engajamento míssil/aeronave se mostra como de alta complexidade e multidisciplinar, na medida em que é determinado pela interação de diversos sistemas e seus respectivos subsistemas [4].

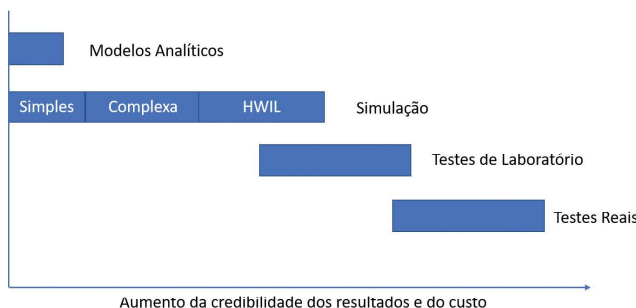


Figura 1 – Métodos de predição de desempenho de sistemas. [4].

Projetistas e avaliadores de sistemas podem empregar uma ampla variedade de métodos para obterem informações a respeito de cada um dos subsistemas, ou até mesmo do sistema como um todo (míssil).

Nesse contexto, podem-se destacar: estimativas analíticas, simulações computacionais, testes de laboratórios e testes reais [4]. A Fig. 1 ilustra tais métodos, bem como indica a relação entre a credibilidade e custos totais (gastos operacionais, recursos humanos e etc) para os mesmos.

De forma geral, modelos de simulação podem ser capazes de gerar assimetria no desenvolvimento de conhecimento técnico-operacional, bem como de doutrina de emprego. Isto se dá quando o modelo de simulação computacional é desenvolvido pela própria organização, uma vez que, possuindo o domínio da plataforma, existe a capacidade de aprimorá-lo continuamente, validando-o com os resultados experimentais, de acordo com as necessidades específicas.

Uma plataforma de simulação desenvolvida de forma autóctone pode beneficiar, e ser beneficiada, por diversos usuários da FAB. Além disso, o desenvolvimento de um modelo de simulação que se mostre robusto e realista é capaz de fornecer subsídios para o desenvolvimento de doutrina de emprego operacional, com um mínimo de tempo e recursos, sejam eles humanos ou financeiros. Na Fig. 2 expõe-se um diagrama com algumas relações possíveis entre o *framework* de simulação e usuários.

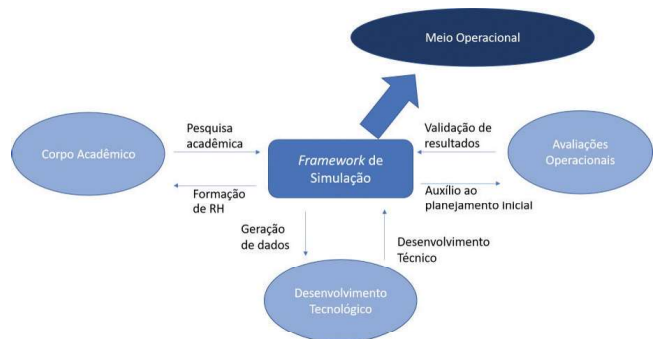


Figura 2 – Relações entre usuários do modelo de simulação.

Uma pesquisa acadêmica bem conduzida é capaz de gerar conhecimento que atua diretamente na melhoria do *framework* de simulação, o qual pode ser utilizado recorrentemente na formação de novos recursos humanos (RH), por meio da possibilidade de se analisarem sistemas complexos de maneira prática.

Por outro lado, os órgãos de desenvolvimento tecnológico beneficiam diretamente o modelo de simulação por meio do conhecimento amadurecido e desenvolvido, ao mesmo tempo em que são beneficiados pelos dados que a simulação fornece.

Por fim, os usuários responsáveis pelas avaliações operacionais podem utilizar os resultados da simulação para balizar sua avaliação, identificando possíveis parâmetros críticos à efetividade do sistema avaliado.

As avaliações operacionais, por outro lado, beneficiam o modelo de maneira crítica, uma vez que o validam. Todos esses usuários, em conjunto, são responsáveis por desenvolver o modelo de simulação de forma que o mesmo seja capaz de viabilizar o constante incremento de doutrina para emprego operacional.

II - MÍSSEIS INFRAVERMELHOS

A abordagem fundamental para se determinar a posição do alvo nas primeiras gerações de seekers infravermelhos se dava utilizando um único detector, o qual possuía um retículo rotacional (ou modulador) na sua frente. O retículo é um pequeno disco com zonas transparentes e opacas alternadas, conhecidas como setores, os quais modulam a energia radiante incidente que chega ao detector.

Os sinais elétricos modulados, gerados pelo detector, são processados por filtros e por um detector de envelope, sendo então convertidos em comandos de guiamento para o sistema de controle do míssil. Estes provêm os comandos de correção de trajetória tanto para o piloto automático quanto para os sistemas de guiamento, a fim de permitir que o míssil intercepte o alvo de interesse.

A. Primeira Geração

A primeira geração de mísseis infravermelhos, mais simples e mais proliferada no mundo, utiliza um retículo rotacional, ou *spin-scan*. O mais conhecido destes retículos é o *rising sun*, o qual possui metade do retículo com transmitância de 50%, sendo a outra metade dividida em setores opacos e transparentes, alternados. O retículo gira a uma frequência constante, a qual é conhecida como frequência de *spin*, ou de giro.

Outro parâmetro importante é a frequência da portadora, ou *Carrier*, gerada pelas características dos setores. Quando o alvo está fora do eixo óptico do *seeker*, uma modulação em amplitude é gerada. A distância do alvo em relação ao centro do retículo determina a amplitude do sinal, enquanto a fase do mesmo determina posição angular do alvo. A principal limitação destes *seekers* se dá quando o alvo se encontra alinhado com o eixo óptico, uma vez que, desta maneira, o sinal enfraquece muito, sendo superado pelo nível de ruído, prejudicando desta forma o guiamento do míssil. A Fig. 3, ilustra o retículo do SA-7 b [5].



Figura 3 – Ilustração e foto do retículo do SA-7 [5].

B. Segunda Geração

Este tipo de *seeker* foi desenvolvido para superar as limitações da geração anterior em rastrear alvos alinhados com seu eixo óptico. Neste caso, o retículo é estacionário, enquanto o espelho secundário do conjunto óptico do *seeker* é que rotaciona. Assim, o alvo permanece sempre girando no campo de visada do *seeker*, modulando em frequência o sinal no detector. A Fig. 4 ilustra o retículo do SA-14.



Figura 4 – Foto do retículo do SA-14 [5].

C. Terceira Geração

O principal avanço obtido com a terceira geração de *seekers* foi o desenvolvimento de contramedidas mais robustas. Isso os tornou muito mais resistentes a quaisquer tipos de contramedidas implementadas pela aeronave. Para conseguir isso, novas técnicas de varredura foram usadas/desenvolvidas, em oposição ao sistema de retículo convencional.

O desenvolvimento de *seekers* e de técnicas de rastreamento de alvo mais modernas se mantém até a atualidade, não sendo mais necessário o emprego de retículos.

III - DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação proposto neste trabalho foi implementado em MATLAB/SIMULINK e consiste dos seguintes sistemas:

- Modelo de dinâmica do míssil infravermelho;
- Simulação do processamento de sinal/imagem coletado pelo aparato óptico do míssil;
- Modelagem do cenário radiométrico, incluindo a assinatura infravermelha do alvo, por meio de realidade virtual; e
- Modelagem das contramedidas.

Basicamente, o modelo de simulação consiste na modelagem de um mundo virtual em VRML, no qual as cores dos objetos estão relacionadas com as propriedades radiantes dos respectivos materiais.

Os objetos modelados no mundo virtual são os alvos, *background* e contramedidas. As posições e orientações destes objetos são calculadas por meio de suas equações dinâmicas, e cada intervalo de tempo é alimentado no mundo virtual.

O *output* do mundo virtual se apresenta como um vídeo/imagem cujo ponto de vista é determinado pela posição e orientação do autodiretor do míssil. A partir deste ponto técnicas de processamento de imagem são aplicadas para converter a imagem coletada do mundo virtual em grandezas radiométricas e então modelar o sinal a ser processado pelo míssil de acordo com seu tipo de autodiretor.

De acordo com a lei de guiamento aplicada neste trabalho, gera-se uma aceleração comandada, a qual é transferida ao autopiloto, gerando a resposta aerodinâmica desejada, e modificando a posição e orientação do míssil no mundo virtual. A Fig. 5 ilustra todo esse processo.

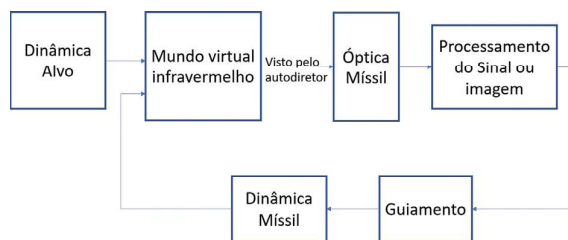


Figura 5 – Modelo geral de simulação.

A. Cenário Radiométrico

Para se visualizar a assinatura infravermelha de um cenário, primeiramente se faz necessário modelar a geometria de toda a cena a partir do ponto de vista do autodiretor do míssil. Os objetos típicos em um cenário infravermelho são os alvos, o céu, o solo e as contramedidas. O modelamento geométrico e o do movimento desses objetos podem ser realizados utilizando-se sistemas de modelagem em 3 dimensões (3D) conhecidos como sistemas de modelagem de realidade virtual.

Neste estudo, emprega-se o padrão de modelagem *3D Virtual Reality Modelling Language* (VRML), uma vez que este é o formato empregado pelo MATLAB/SIMULINK para modelar mundos virtuais por meio do pacote *3D Animation*.

Um cenário de engajamento entre um míssil e um alvo deve ser modelado em três dimensões para maior realidade. O modelamento deste cenário se inicia com a criação dos elementos principais (aeronaves, contramedidas, *background*) cujas posições e ângulos de orientação são determinados de acordo com os modelos cinemáticos empregados.

Modelos genéricos de aeronaves em 3 dimensões podem ser obtidos na internet, os quais consistem de centenas de polígonos, podendo ser agrupados em pequenas partes. Quando estas possuem as mesmas propriedades radiométricas e termais, elas podem ser representadas como sub-alvos,

no modelo de assinatura infravermelha. Tais características radiométricas podem ser controladas e determinadas de forma independente. O modelo de uma aeronave Boeing 737 em três dimensões, fornecido pelo próprio *software* de simulação, foi utilizado, sendo acrescentados novos elementos para se modelar os bordos de ataque, o nariz da aeronave, a pluma dos gases de exaustão e os motores. A aeronave modelada foi dividida nos seguintes sub-alvos:

- A parte principal da estrutura da aeronave, composta da fuselagem, asas, nariz e empenagem aquecidas pelo fluxo aerodinâmico;
- Vidros do para-brisa;
- Motores do tipo turbofan, os quais são subdivididos em entrada de ar, parte externa e escapamento; e
- A pluma dos gases de exaustão.

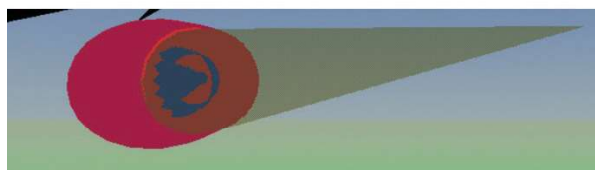
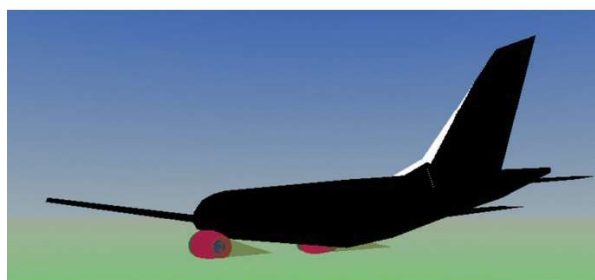
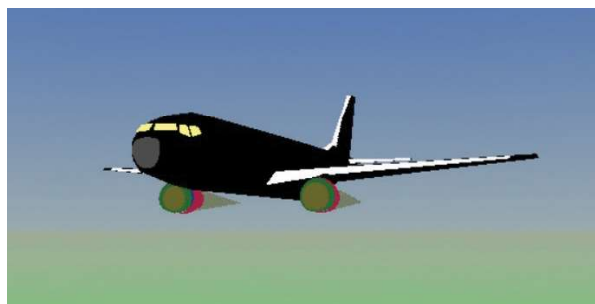


Figura 6 – Modelo tridimensional da aeronave B-737 empregado.

A Fig 6 ilustra o modelo radiométrico da aeronave Boeing 737 empregado, e cujas propriedades radiométricas dos objetos estão discriminados pelas diferentes cores, as quais nessa figura ainda não correspondem a nenhuma escala de intensidade, apenas retratando os diferentes sub-alvos.

O movimento da aeronave, e conseqüente fluxo de ar, faz com que a convecção seja o processo de transferência de calor dominante e que praticamente toda fuselagem externa esteja a uma temperatura próxima à temperatura da camada limite do ar [6]. Assim, a temperatura da superfície externa da fuselagem pode ser aproximada pela temperatura de

T_r recuperação, a qual é função da temperatura do ambiente T_o , do fator de recuperação r , a razão do calor específico do ar γ e o número de Mach M [6,7]:

$$T_r = T_o \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \quad (1)$$

Assim, a temperatura de cada sub-alvo é a temperatura cujo fator de recuperação é dado pela posição do sub-alvo na aeronave. De acordo com [7], assume-se o fator de recuperação de 0,6 para a fuselagem da aeronave, 0,7 para a parte traseira das asas, 0,8 para o nariz, partes dorsal e ventral da fuselagem central e 0,9 para os bordos de ataque das asas. Além disso, considera-se a emissividade de todos estes componentes como 0,9 [7].

O motor da aeronave Boeing 737 é do tipo turbofan, de acordo com [7], podendo-se dividir o mesmo em três regiões visíveis com propriedades radiométricas diferentes, quais sejam: a entrada de ar (*inlet*), o escapamento e a parte externa. Diferentemente das outras partes, a parte externa pode ser modelada como uma superfície da fuselagem, sendo a entrada de ar modelada com temperatura de 85° C e emissividade de 0,9, enquanto o escapamento é modelado com uma temperatura de 840 K e emissividade de 0,9.

O formato e o volume da pluma não são constantes. Devido ao rápido movimento da aeronave, bem como da presença de gases (CO₂ e CO) na atmosfera, a pluma se dilui gradualmente na atmosfera, sendo difícil se determinar um limite entre ambas. Visando ao modelamento deste trabalho, a pluma de exaustão de escapamento pode ser dividida em regiões de mesma temperatura, pressão e densidade [6]. A maior parte da radiação da pluma é formada pela região mais próxima do plano de saída, chamada de núcleo invíscido. Para um escapamento circular, o núcleo invíscido pode ser aproximado para um formato cônico cuja área da base corresponda à área de saída do escapamento, e cujo comprimento é dependente do número de Mach da densidade do fluido de exaustão [6].

Diferentemente de metais e de outros sólidos, a emissividade dos gases é altamente dependente do comprimento de onda, enquanto a atmosfera absorve nos comprimentos de onda de maior emissão da pluma [6]. Desta forma, a pluma emite em apenas algumas pequenas faixas do espectro infravermelho. Estudos como [7], modelaram e validaram experimentalmente a pluma de exaustão de motores turbofan, motivo pelo qual, juntamente com o apresentado no modelo de [4], adota-se a seguinte emissividade espectral da pluma, representada na Fig.7:

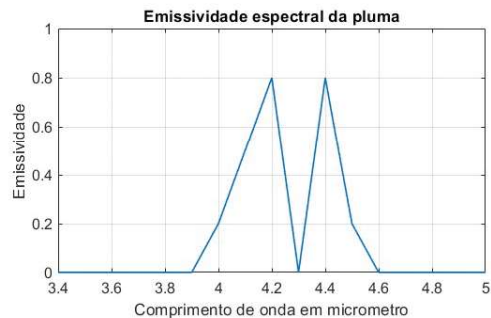


Figura 7 – Emissividade espectral da pluma.

O valor da emissividade para comprimentos de onda não especificados é zero. Além disso, diferentemente dos outros objetos, a pluma não é opaca, possuindo um valor de transmitância determinado pelo valor de emissividade espectral, o qual obedece à Lei de Kirchhoff de Radiação Térmica e à Lei de Conservação de Energia.

A propriedade radiométrica modelada para cada sub-alvo é a radiância que é obtida pela Lei de Planck para uma fonte Lambertiana dada por (2):

$$L_\lambda(\lambda, T, \varepsilon) = \varepsilon \frac{1}{\pi} \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2)$$

Onde L_λ é a radiância espectral que, para cada sub-alvo, é função da emissividade e da temperatura T , em Kelvin, λ é o comprimento de onda, C_1 a primeira constante de radiação, C_2 a segunda constante de radiação.

Neste estudo consideram-se o céu e o solo como monocores, cuja radiância é calculada usando a equação 2 assumindo um terreno do tipo floresta plana [3], com temperatura de 293,15 K e 0,9 de emissividade, enquanto o céu possui temperatura de 293 K e 0,9 de emissividade.

A caracterização óptica do mundo virtual é feita aplicando cores “falsas” ao cenário. Os parâmetros empregados em VRML são: a cor emissiva (*EmissiveColour*), associada à radiância, e a transparência (*Transparency*), associada à transmitância.

A cor emissiva de cada objeto é dada pelo valor normalizado do produto entre a radiância e a transmitância atmosférica pelo valor máximo deste produto modelado em todo cenário infravermelho.

A transparência de um objeto é determinada pela sua transmitância.

Em VRML, a posição dos objetos é determinada por meio dos parâmetros de translação e rotação. Estes parâmetros são descritos abaixo:

a) *Translation*: O parâmetro de translação especifica a posição do objeto em coordenadas do mundo virtual; e

b) *Rotation*: O parâmetro de rotação especifica a direção da orientação do objeto em coordenadas

do mundo virtual.

A seguir, são demonstrados resultados da modelagem da assinatura infravermelha da aeronave Boeing 737, voando a 0,3 Mach, modelada com os parâmetros descritos anteriormente. As cenas radiométricas foram plotadas em uma escala de intensidade de cor cinza, com 256 níveis de cores, de forma relativa, na Fig. 8. Além disso, os cenários infravermelhos foram modelados em três bandas do espectro eletromagnético. A primeira de 2 a 2,7 μm , que é empregada por mísseis de primeira geração. A segunda, de 3,9 a 4,7 μm , e a terceira, de 8 a 12 μm , são empregadas por mísseis de última geração.

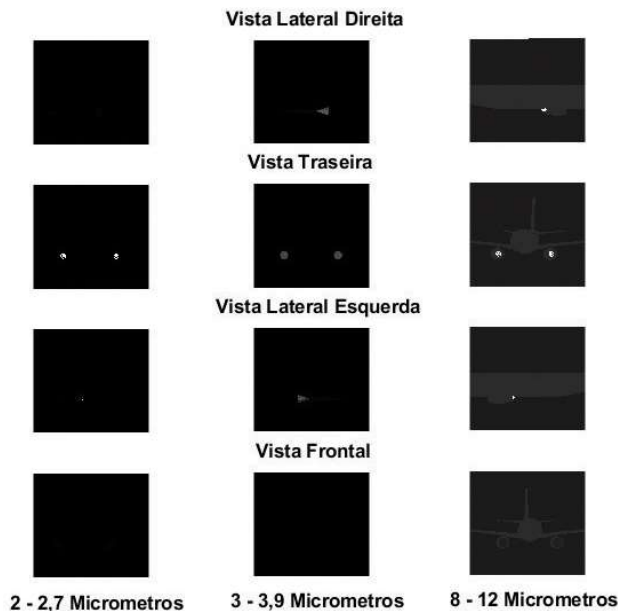


Figura 8 – Assinatura infravermelha empregada.

Nota-se, na Fig. 8, a limitação a engajamentos traseiros para mísseis de primeira geração, devido à capacidade de conseguir distinguir do plano de fundo somente o escapamento dos motores. Já em mísseis capazes de detecção na banda de 3,9 a 4,7 μm , percebe-se que se é capaz de distinguir do plano de fundo em todos os ângulos de aspecto, com exceção do frontal, uma vez que se detecta a pluma de exaustão dos gases do escapamento. Por último, na banda de 8 a 12 μm , percebe-se a capacidade de engajamento em todos os ângulos de aspecto.

B. Autodiretores de 1ª geração

O processo de simulação de um autodiretor de primeira geração é efetuado empregando-se técnicas de processamento de imagem. Autodiretores de primeira geração empregam retículos rotacionais que acabam por filtrar espacialmente a radiação coletada.

Empregando-se o modelo radiométrico da aeronave Boeing 737, na banda espectral de 2 a 2,7 μm , a uma distância de 2 km do sensor com engaja-

mento traseiro, simulou-se um autodiretor de primeira geração com um retículo do tipo *rising-sun* rotacionando a uma frequência de 100 Hz. A Fig. 9 ilustra a imagem vista pelo autodiretor, o retículo empregado e o sinal gerado pelo detector.

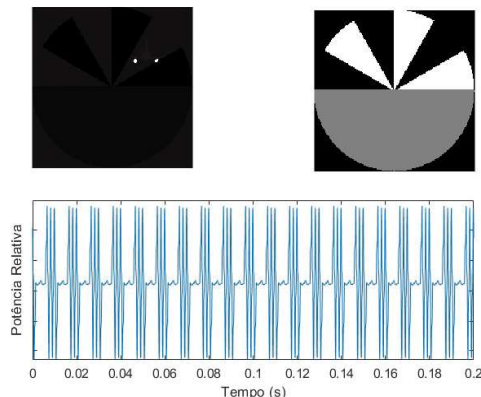


Figura 9 – Imagem coletada, retículo empregado e sinal gerado por um autodiretor de primeira geração.

A partir do sinal gerado, técnicas de processamento de sinal analógicas são empregadas, sendo estas bastantes difundidas na literatura [8,9], tanto para os autodiretores de primeira quanto de segunda geração, estes exemplificados a seguir.

C. Autodiretores de 2ª geração

Autodiretores de segunda geração são constituídos de um retículo estacionário sobre o qual é rotacionada a radiação coletada pela ótica do míssil.

Com o modelo radiométrico da aeronave Boeing 737, na banda espectral de 3 a 5 μm , a uma distância de 2 km do sensor e com engajamento as 5 horas do alvo, empregou-se um retículo do tipo *wagon-wheel*, com oito pares de transmitâncias alternados e com rotação da imagem a uma frequência de 100 Hz. A Fig 10 ilustra a imagem vista pelo autodiretor, o retículo empregado e o sinal gerado pelo detector.

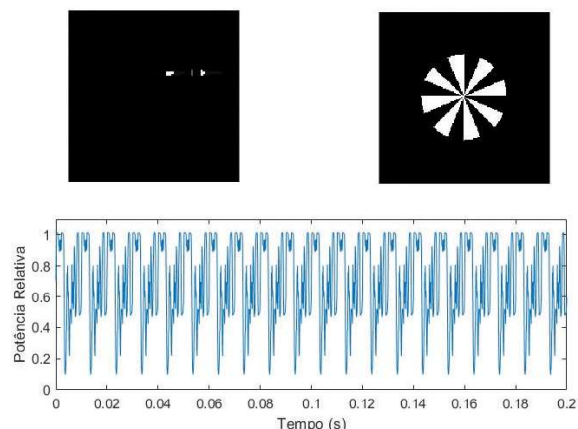


Figura 10 – Imagem coletada, retículo empregado e sinal gerado por um autodiretor de primeira geração.

D. Autodiretores de 3ª geração

O tipo de autodiretor infravermelho de 3ª geração mais empregado é o do escaneamento do tipo roseta. O aparato óptico modelado consiste em dois prismas rotacionando a 81 kHz e 66 kHz, gerando o padrão de escaneamento ilustrado na Fig. 11. Empregou-se o modelo radiométrico da aeronave Boeing 737 na banda de 3,9 a 4,7 μm a uma distância de 1 km com engajamento as 10 horas do alvo. A Fig. 11 também ilustra a imagem vista pelo autodiretor e o sinal gerado pelo detector.

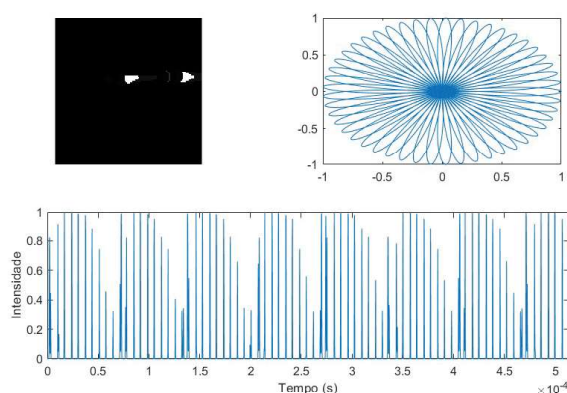


Figura 11 - Imagem coletada, escaneamento roseta empregado e sinal gerado por um autodiretor de terceira geração.

Diversas técnicas de processamento de sinal de autodiretores do tipo roseta são conhecidas, das quais as técnicas projectiva, de limiar e de momento podem ser encontradas em [10].

E. Dinâmica do Míssil

No cenário IR, a estrutura física do míssil não é modelada, sendo apenas representado pelo ponto de vista do mundo virtual. Na linguagem VRML existe uma ferramenta específica para modelagem de pontos de vista, conhecido como objeto *ViewPoint*. Este objeto é de extrema importância pois, por meio dele que é obtida a imagem que será processada pelo autodiretor do míssil.

Neste estudo, o objeto *ViewPoint* é modelado por meio dos seguintes parâmetros:

- Field of View* (FOV): Determina o ângulo em radianos do campo de visada do ponto de vista modelado, que neste trabalho corresponde ao FOV do autodiretor;
- Position*: Corresponde à posição do autodiretor no sistema de coordenadas do mundo virtual;
- Orientation*: Determina a direção de apontamento do autodiretor do míssil no sistema de coordenadas do mundo virtual.

Como se faz necessário que a orientação do míssil seja determinada continuamente, devem-se

empregar modelos de dinâmica de mísseis com 5 ou 6 graus de liberdade. Estes modelos podem ser considerados de alta complexidade, de forma que se faz necessário o uso de parâmetros confiáveis obtidos por meio de outros *softwares*, dos quais citam-se, como exemplos, os coeficientes aerodinâmicos e os parâmetros de propulsão. Um equacionamento da dinâmica em 6 graus de liberdade, e sua implementação em linguagem Pascal, pode ser obtido em [11].

Empregando-se os parâmetros de posição e orientação no mundo virtual se tem uma fácil integração com um modelo de dinâmica implementado em MATLAB.

F. Modelos de Contramedidas

No modelamento em VRML, as contramedidas infravermelhas são novos alvos, ou seja, devem ser modeladas como novos objetos nos cenários.

Contramedidas embarcadas do tipo *jammer*, como o embarcado na aeronave AH-2, pode ser modelado como um sub-alvo da aeronave cuja irradiância varia com o tempo. Já contramedidas do tipo DIRCM, que será embarcada na aeronave KC-390, pode ser modelada por meio do seu perfil de irradiância que chega ao aparato ótico do míssil.

As contramedidas ejetáveis do tipo *flare* devem ter suas características espectrais e cinemáticas determinadas. As características espectrais, que são as de maior dificuldade de obtenção, podem ser obtidas com um alto grau de confiança em [12] para flares MTV. Já as características cinemáticas podem ser estimadas, com maior facilidade, tanto para flares convencionais quanto cinemáticos.

IV - APLICABILIDADE OPERACIONAL E CIENTÍFICA

A aplicabilidade deste *framework* de simulação tem como principal beneficiário o meio operacional, o qual pode empregá-lo para análise de evasivas, de contramedidas e de emprego. Porém, a sua confiabilidade depende do grau de confiança dos modelos e dados empregados. Além disso, é de extrema importância a certificação experimental dos dados empregados.

Ressalta-se que este modelo ainda apresenta forte potencial para desenvolvimentos futuros, e que suas aplicações se desenvolvem à medidas que novas demandas surgem, ou que outros especialistas venham a aplicar seu conhecimento nesta plataforma. Desta forma, devem-se estimular Oficiais de Guerra Eletrônica e/ou engenheiros das diversas unidades da Força Área a somarem esforços no desenvolvimento dos seguintes tópicos.

- Desenvolvimento de assinaturas infraver-

melhas das aeronaves de interesse operacional;

- Melhoria do modelo dos sistemas ópticos empregados;
- Implementação de contramedidas infravermelhas do tipo flares e sua análise de efetividade contra diversos tipos de mísseis;
- Integração de modelos dinâmicos de alta confiabilidade de mísseis infravermelhos; e
- Modelamento e desenvolvimento de técnicas de processamento de sinal e imagem com medidas de proteção eletrônica.

V - CONCLUSÕES

Como pôde ser observado, o crescente desenvolvimento tecnológico demanda técnicas de avaliação e predição de desempenho de sistemas cada vez mais complexas. Dentre estas possíveis técnicas, foi descrito um modelo de simulação que apresenta elevado potencial para beneficiar e ser beneficiado por diversas organizações da Força Aérea Brasileira.

Um modelo de simulação de engajamento de mísseis infravermelhos foi descrito, o qual, por meio de emprego do software MATLAB/SIMULINK, modelou um cenário de realidade virtual, cujas características de iluminação correspondem a parâmetros radiométricos calculados analiticamente. Empregando esta técnica, apresentou-se um modelamento de assinatura infravermelha da aeronave Boeing 737 em múltiplas bandas de interesse do espectro infravermelho.

Com o cenário e alvos modelados, é possível coletar-se imagens do mundo virtual, de um ponto de vista cuja posição e orientação correspondem à visão do autodiretor do míssil infravermelho. A partir da coleta desta imagem, podem-se empregar diversas técnicas de processamento de imagens a fim de simular a geração de sinal por autodiretores de 1ª, 2ª e 3ª gerações. Por último, foram descritos processos de integração do cenário em realidade virtual com a dinâmica do míssil e com contramedidas infravermelhas.

Esse modelo se apresenta como uma ferramenta flexível que pode colaborar com o desenvolvimento de doutrina de emprego de diversos vetores e sistemas. Ressalta-se que o mesmo continua em desenvolvimento e estimula-se a comunidade técnico-operacional em geral a propor novas funcionalidades, analisar e avaliar resultados e, principalmente, desenvolver novas aplicações.

REFERÊNCIAS

[1] TITTERTON, D. **The interaction in the development of optical missile seekers and jammer technology.** The Imaging Science Journal, v.58, p. 276-285, 2010.

[2] AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Man-Portable Air Defense Systems (MANPADS) Countering the terrorist threat.** 2008.

[3] BAQAR, S. **Low-cost PC-based High-Fidelity Infrared Signature Modelling and Simulation.** PhD Thesis - Cranfield University, 2007.

[4] STRICKLAND, J. **Missile Flight Simulation – Surface to Air Missiles.** 2. Ed. Raleigh: Lulu Press, 2015.

[5] JACKMAN, J. **Pre-emptive Infrared Countermeasures.** PhD Thesis – Cranfield University, 2011.

[6] DUDZIC, M. C. **The Infrared and Electro-optical Systems Handbook – Volume 4: Electro-optical Systems Design, Analysis and Testing.** SPIE Press, 1993.

[7] COIRO, E.; CHATELARD, C.; DURAND, G.; LANGLOIS, S.; MARTINENQ, J. P. **Experimental Validation of an Aircraft Infrared Signature Code for Commercial Airlines.** American Institute of Aeronautics and Astronautics. In: 43rd Thermophysics Conference, Nova Orleans, 2012.

[8] SILVESTRE, C. A. M.; FARIA, L. A.; NUNES, D. A. **Directed Infrared Countermeasures (DIRCM): Conhecendo Conceitos para se desenvolver doutrina.** SPECTRUM: Revista do Comando Geral de Operações Aéreas, Brasília, n.20, p.4-10, set. 2017.

[9] BAE, T.; KIM, B.; KIM, Y.; AHN, S.; **Jamming effects analysis of infrared reticle seeker for directed infrared countermeasures.** Infrared Physics and Technology, v. 55, p. 431-441. 2012.

[10] JAHNG, S.; HONG, H.; HAN, S.; SEO, D.; CHOI, J. **3D simulator for the rosette-scanning seeker using the thresholding techniques.** In: SPIE Conference on Acquisition, Tracking and Pointing. Orlando, Florida, 1999.

[11] CECIN, Y. B.; **Análise do desempenho de um míssil com seis graus de liberdade usando navegação proporcional perseguindo um alvo manobrável.** Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1989.

[12] MAGALHÃES, L. B.; ALVES, F. P. D. **Estimation of radiant intensity and average emissivity of Magnesium/Teflon/Viton (MTV) Flares.** In: SPIE Conference on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing. Orlando, Florida, 2010.