

Banco de dados de assinatura infravermelha: importância nas aplicações operacionais e no desenvolvimento de detectores

Luciano Barbosa Magalhães, Fábio Durante Pereira Alves

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP - Brasil

Resumo — Este trabalho tem como objetivo mostrar a importância da criação de um banco de dados de assinaturas infravermelhas em simulações e no desenvolvimento de detectores. Inicialmente foram apresentados alguns conceitos básicos de infravermelho necessários à compreensão das estimativas realizadas. Após isso, foi feita uma descrição simplificada de três fontes diferentes de infravermelho. Depois, as assinaturas das fontes foram estimativas e comparadas, visando identificar algumas características básicas necessárias para compor um banco de dados. Finalmente, foram apresentadas algumas aplicações diretas de um banco de dados na área operacional e no desenvolvimento de detectores eficazes na discriminação de flares.

Palavras-chaves — assinatura infravermelha, banco de dados, flare.

I. INTRODUÇÃO

A recente modernização pela qual a Força Aérea Brasileira vem passando faz com que mais tipos de mísseis infravermelhos sejam incorporados aos seus arsenais e grande parte das suas aeronaves sejam equipadas com modernos sistemas de autodefesa. Paralelo a isso, visando a independência tecnológica, o Laboratório de Guerra Eletrônica do ITA busca o desenvolvimento de novos detectores, o que exige a medição de assinaturas de alvos militares conhecidos e a estimação de alvos desconhecidos. Além disso, os bancos de dados formados terão aplicação operacional direta, permitindo a utilização eficaz dos equipamentos existentes nos esquadrões, bem como a excelência na formação das equipagens militares.

II - CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Planck, a emitância radiante espectral de um corpo negro, em $W / cm^2 \cdot \mu m$, pode ser obtida através da seguinte equação:

$$M_0(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

Luciano Barbosa Magalhães – Cap Av, lbmag@ig.com.br, Tel +55-12-39476895, ramal 6895.

Este trabalho foi totalmente financiado pelo COMAER, através do PPGA0 (Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais).

Onde, $c = 3 \times 10^8 m/s$ é a velocidade da luz, $h = 6,625 \times 10^{-34} Ws^2$ é a constante de Planck; e $k = 1,380 \times 10^{-23} Ws / K$ é a constante de Boltzmann [1].

O corpo negro é um corpo ideal, que absorve toda a radiação que incide sobre ele, sem refletir ou transmitir. [2] Entretanto, o corpo negro não existe na natureza, o que existe são basicamente os corpos cinza e os radiadores seletivos. Estes representados pelos gases e aqueles, por sólidos e líquidos. [3]

Dessa forma, se é necessário calcular a quantidade de radiação produzida por um corpo real, deve-se utilizar um fator de correção: a emissividade, que é a razão entre emitância radiante espectral de um corpo a uma dada temperatura, $M(\lambda)$, e a de um corpo negro na mesma temperatura, $M_0(\lambda)$, conforme mostra a equação (2): [3]

$$\varepsilon = \frac{M(\lambda)}{M_0(\lambda)} \quad (2)$$

A emissividade é igual a um para um corpo negro e menor que um para um corpo cinza. A emissividade para corpos cinza é essencialmente constante ao longo do espectro, enquanto para os radiadores seletivos a emissividade tem uma ampla variação ao longo do mesmo. [2] Entretanto, até mesmo radiadores seletivos podem ser considerados corpos cinza, se forem analisados numa faixa de espectro estreita o suficiente para que a emissividade seja constante [3].

Portanto, para calcular a emitância radiante produzida por uma fonte, numa determinada faixa do espectro eletromagnético, a uma dada temperatura, em W / cm^2 utiliza-se a equação (3) abaixo.

$$M = \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_0(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Multiplicando-se a emitância radiante espectral encontrada na equação (3) pela área da fonte, encontra-se o valor do fluxo radiante (P) produzido pela fonte, em W , de acordo com a equação (4). [4]

$$P = M \cdot A_{\text{fonte}} \quad (4)$$

Onde, A_{fonte} é a área da fonte em cm^2 . Entretanto, para efetuar o cálculo de distância máxima de detecção infravermelha utiliza-se a intensidade radiante, em W/sr , que é dada pela equação (5). [4]

$$J = \frac{P}{\Omega} \quad (5)$$

Onde Ω é o ângulo sólido, em esterradiano (sr). Considerando-se que um corpo negro irradia por um hemisfério de ângulo sólido de 2π radianos, de acordo com a Lei dos cossenos (Lei de Lambert), o valor de Ω será π , ao invés de 2π . [4] Portanto, a intensidade radiante da equação (5) pode ser reescrita conforme a equação (6).

$$J = \frac{P}{\pi} \quad (6)$$

A intensidade radiante encontrada é a da fonte, ou seja, esse valor ainda sofrerá atenuação diretamente proporcional à transmitância atmosférica e inversamente proporcional ao quadrado da distância, antes de chegar até um determinado sistema óptico. [4]

Através da Lei de deslocamento de Wien é possível estimar o comprimento de onda, em μm , em que a emitância radiante espectral é máxima, conforme a equação (7). [4]

$$\lambda_{máx} \cong \frac{2898}{T} \quad (7)$$

Onde T é a temperatura absoluta em K.

III – DESCRIÇÃO DAS FONTES

Uma vez identificados os conceitos básicos necessários para se estimar a assinatura infravermelha aproximada de um corpo, pode-se então dar início à descrição das três fontes que farão parte dessa simulação. Serão utilizados apenas dados ostensivos disponíveis na literatura.

A. Primeira fonte

Aeronave turbojato, sem pós-combustor e que mantém um regime intermediário de potência. Considera-se que a emissão é exatamente do setor traseiro da aeronave. Além disso, possui as seguintes características:

- Temperatura da tubeira $\approx 1000K$; [3]
- Corpo cinza com emissividade ≈ 0.90 ; [3]
- Área da saída de exaustão $\approx 2500cm^2$;
- Velocidade mantida pela aeronave $\approx Mach 0.8$.

Assume-se que a radiação produzida pelo aquecimento aerodinâmico é desprezível;

Apesar da radiação produzida pelos gases de exaustão ser relevante para a composição da assinatura infravermelha da aeronave, por uma questão de simplificação, não será considerada nesse artigo.

B. Segunda fonte:

Flare convencional, cujas características são:

- Temperatura de queima $\approx 2000K$; [5]
- Corpo cinza com emissividade ≈ 0.95 ; [6]
- Composição: MTV (magnésio-Teflon-Viton); [5]
- Área média estimada do flare $\approx 57cm^2$ (valor

estimado com base no tamanho padrão de um cartucho convencional $2,5 \times 5,2 \times 20,5$ cm [7]). É difícil estimar a área da superfície de radiação de um *flare* em vôo, além disso, durante o processo de combustão, o *flare* vai sendo consumido, o que diminui as suas dimensões. [8]

C. Terceira fonte:

Flare de material especial, cujas características são:

- Temperatura de queima $\approx 1093K$; [5]
- Corpo cinza com emissividade ≈ 0.95 ; [6]
- Composição: ferro pirofórico (*pyrophoric iron*).

Este tipo de *flare* consiste de pequenas tiras de folhas de aço cobertas com ferro pirofórico. Quando são lançadas oxidam em contato com o ar e aquecem até a temperatura supracitada; [5]

d) Área de cada tira $\approx 13cm^2$ (valor estimado com base no tamanho padrão de um cartucho convencional $2,5 \times 5,2 \times 20,5$ cm [7]);

e) Número de tiras ≈ 1.000 unidades (Assume-se que cada folha tenha 0,2mm de espessura num tubo com aproximadamente 20,5 cm de comprimento);

f) Área média da nuvem de flare $\approx 1300cm^2$ (Assume-se um valor correspondente a 10% da área formada se todas as folhas de *flare* estivessem alinhadas e perpendiculares com a direção de interesse). Assim, como no caso do *flare* convencional, também é difícil estimar a área da nuvem formada, pois as folhas modificam sua posição aleatoriamente, além de se expandirem após o momento do lançamento, aumentando a área da nuvem.

IV – ESTIMAÇÃO E COMPARAÇÃO DE ASSINATURAS INFRAVERMELHAS

Com base nos dados das fontes e na equação (1) obtém-se o gráfico da emitância radiante espectral, em $W/cm^2 \cdot \mu m$, para corpos negros nas mesmas temperaturas das três fontes, de acordo a Fig. 1.

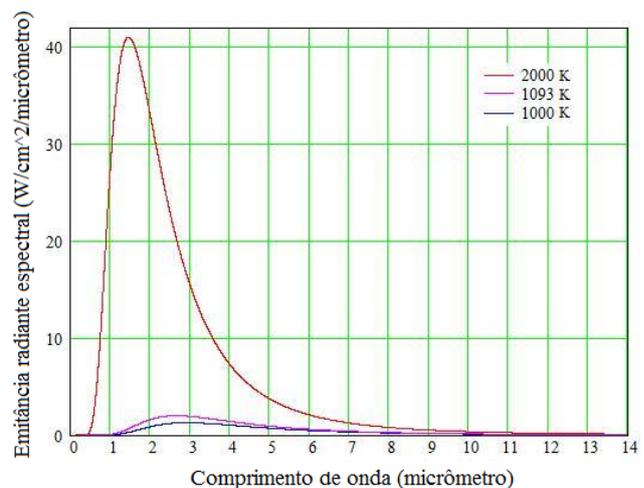


Fig. 1. Emitância radiante espectral de um corpo negro a 1000K, 1093K e 2000K de temperatura, em função do comprimento de onda.

Pode-se observar que o comprimento de onda de maior emitância radiante obedece a Lei de deslocamento de Wien, ou seja, um corpo com maior temperatura vai emitir mais radiação em comprimentos de ondas menores. Dessa forma, os $\lambda_{m\acute{a}x}$ para 2000K, 1093K e 1000K são, respectivamente, 1,45 μm , 2,65 μm e 2,89 μm .

Considerando as emissividades e as áreas superficiais de cada fonte pode-se estimar a intensidade radiante espectral, em $W/sr.\mu\text{m}$, de cada uma delas, mostradas na Fig. 2.

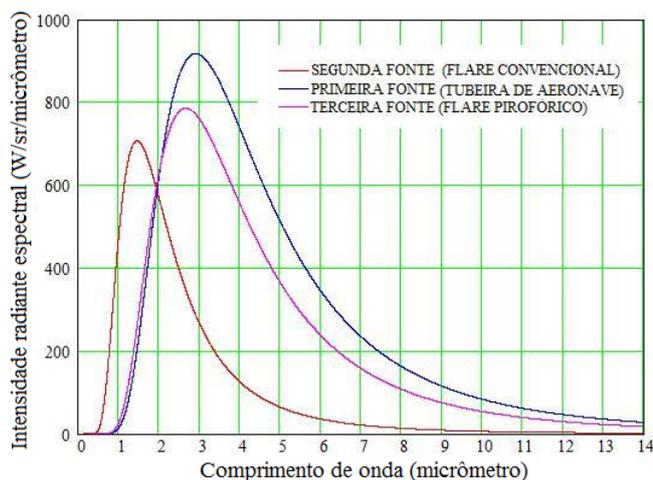


Fig. 2. Intensidade radiante espectral estimada das fontes a 1000K, 1093K e 2000K de temperatura em função do comprimento de onda.

Pode-se observar na Fig. 2 que a Lei de deslocamento de Wien foi novamente obedecida.

De acordo com (6) pode-se estimar a intensidade radiante emitida por uma fonte numa determinada faixa de frequência, conforme as áreas destacadas na Fig. 3.

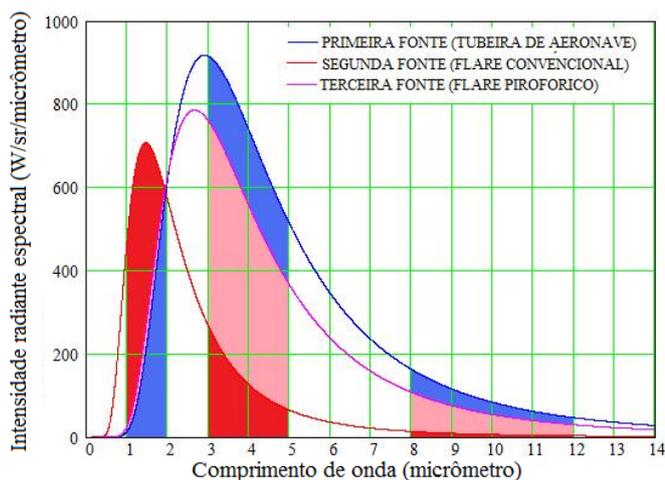


Fig. 3. Área correspondente à intensidade radiante estimada das três fontes em diferentes faixas de comprimento de onda.

Os valores das intensidades radiantes, em W/sr , correspondentes a cada área da Fig. 3 são listadas na Tabela I abaixo.

TABELA I
INTENSIDADE RADIANTE DAS FONTES EM FUNÇÃO DE TRÊS FAIXAS DIFERENTES DE COMPRIMENTOS DE ONDAS.

	Tipo de fonte		
	Tubeira de aeronave	Flare Convencional	Flare pirofórico
1 a 2 μm	267 W/sr	645 W/sr	308 W/sr
3 a 5 μm	1460 W/sr	275 W/sr	1116 W/sr
8 a 12 μm	360 W/sr	27 W/sr	234 W/sr

Observando-se os gráficos da Fig. 1 pode-se perceber que existe uma proporcionalidade entre eles, em função da temperatura absoluta. A primeira vista a quantidade total de radiação produzida pela segunda fonte, o *flare* convencional, é sempre maior do que das demais fontes, em virtude da maior temperatura. Entretanto, as informações de emissividade e, principalmente, da área de cada fonte propiciaram uma quebra na proporcionalidade inicial, possibilitando a diferenciação das fontes em função das faixas de comprimentos de ondas. É importante destacar que os valores estimados são os inicialmente emitidos pelas fontes, sem considerar a atenuação causada pela atmosfera.

De acordo com a Tabela I pode-se observar que a intensidade radiante produzida pelo *flare* convencional entre 1 μm e 2 μm é mais que o dobro das demais fontes. Entre 3 μm a 5 μm a intensidade radiante produzida pelo mesmo é aproximadamente quatro vezes menor. Na faixa entre 8 μm a 12 μm a intensidade radiante produzida chega a ser quase dez vezes menor que a da tubeira da aeronave e a do *flare* pirofórico.

Comparando-se os valores de intensidade radiante da tubeira da aeronave com o do *flare* pirofórico, nas três bandas da Tabela I, percebe-se que apresentam valores aproximados.

Dessa forma, com base na simulação realizada, pode-se observar que é mais fácil diferenciar o espectro da aeronave do espectro do *flare* convencional, do que do *flare* pirofórico.

Com base na simulação realizada foi possível identificar alguns parâmetros básicos para compor um banco de dados, que são: a temperatura, a emissividade e a área da superfície.

Nas simulações realizadas os valores apresentados são fixos, entretanto, na prática, as temperaturas das tuberias sofrem variações em função do regime de potência empregado pelas aeronaves. No caso dos *flares* também é necessário um tempo, uma fração de segundo, para que a temperatura se eleve até que ele apresente uma intensidade efetiva. [8]

A emissividade dos corpos cinza está diretamente relacionada com a superfície e a temperatura dos mesmos. [3] A emissividade dos radiadores seletivos está relacionada com a composição química e também com a sua temperatura. [2]

A área da superfície da fonte permite estimar a quantidade de radiação produzida pela mesma. A utilização de ferramentas matemáticas que considere a modificação das dimensões com a queima, no caso do *flare* convencional, ou a variação das dimensões da nuvem, para o *flare* pirofórico, ou a alteração do ângulo em que a aeronave é vista, pode propiciar uma estimativa mais aproximada da assinatura infravermelha dessas fontes. Portanto, a área, bem como os demais fatores que a modificam diretamente são informações importantes para a montagem de um banco de dados.

IV – APLICAÇÕES DIRETAS DOS BANCOS DE DADOS

Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Michigan: Infrared Information Analysis Center, 1993. v.7.

A utilização das informações provenientes de um banco de dados poderia servir para mostrar que o *flare* pirofórico, conforme observado na Fig. 3, apresenta uma quantidade de radiação praticamente desprezível na faixa do visível (0,4 μ m a 0,77 μ m) possibilitando a sua utilização em operações noturnas ou durante um combate aéreo, sem denunciar a posição da aeronave. De maneira contrária, a utilização do *flare* convencional poderia denunciar a posição da aeronave, uma vez que produz radiação considerável na faixa do visível.

O conjunto de informações que compõe o banco de dados possibilitaria calcular a intensidade radiante de uma determinada aeronave, que poderia ser utilizada para estimar a distância de detecção infravermelha, possibilitando a comparação de parâmetros e a montagem de táticas mais eficazes para o emprego de mísseis infravermelhos, inclusive permitindo um melhor posicionamento dos mísseis terra-ar.

Estimando-se as assinaturas infravermelhas das aeronaves e dos diferentes tipos de *flares* existentes seria possível adequar corretamente o número de *flares* a serem lançados por uma aeronave para que sua contramedida fosse eficaz contra determinados tipos de mísseis infravermelhos.

A utilização de espectroradiômetros para a realização de medições de assinaturas infravermelhas de fontes conhecidas possibilitaria a validação dos modelos matemáticos propostos, que por sua vez poderiam ser utilizados para uma estimativa mais adequada das fontes não conhecidas, aumentando a confiabilidade das informações provenientes do banco de dados.

Este trabalho de medição permitiria quantificar todo o espectro de emissão infravermelha de diversas fontes, o que possibilitaria a identificação das faixas de emissão de maior interesse militar. Estas informações seriam utilizadas para o desenvolvimento de detectores adequados para essas faixas de interesse. Uma aplicação direta desse banco de dados seria o desenvolvimento de detectores que possuam a capacidade de discriminação espectral, ou seja, que sejam capazes de distinguir uma aeronave de um *flare*, possibilitando o desenvolvimento de detectores nacionais dotados de MPE (Medida de proteção Eletrônica).

REFERÊNCIAS

- [1] SCHLEHER, D. C. **Electronic Warfare in the Information Age.** Norwood: Artech House, Inc., 1999. 605 p. ISBN 0-89006-526-8.
- [2] NERI, F. **Introduction to Electronic Defense Systems.** Norwood: Artech House, Inc., 1991. ISBN 0-89006-553-5.
- [3] HUDSON, R. D. **Infrared System Engineering.** New York: John Wiley & sons, 1969.
- [4] NERI, F. **Introduction to Electronic Defense Systems.** Norwood: Artech House, Inc., 2001. ISBN 1-58053-179-2.
- [5] KNOWLES, J.; LAWRENCE, C. New Tricks for flares. **The Journal of Electronic Defense**, Gainesville, v. 29, n. 10, p. 25-27, October 2006.
- [6] WIKIPEDIA, the free encyclopedia. **Flare (countermeasure)**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Flare_\(countermeasure\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Flare_(countermeasure))>. Acesso em: 29 ago. 2008.
- [7] Esterline Defense Group (Armtec Countermeasure) – **Expendable Aircraft Countermeasure** – Air Force Technology. Disponível em: <<http://www.airforce-technology.com/contractors/counter/armtec/>>. Acesso em: 05 set 2008.
- [8] BRUNE, N. Expendable Decoys. In: POLLOCK, D. Countermeasure Systems. cap 4, p. 287-232. In: ACCETA, J. S.; SHUMAKER, D.L. **The**