

Impacto das Características de um Feixe Laser na Efetividade de um DIRCM: Definição de Parâmetros para Avaliação Operacional

Diego Alves Nunes¹ e Vilson Rosa de Almeida^{1,2}

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, S.J. dos Campos - SP, ² Instituto de Estudos Avançados, S.J. dos Campos - SP

Resumo — Com a futura incorporação de sistemas laser como Medida de Ataque Eletrônico com Energia Direcionada nas aeronaves da Força Aérea Brasileira, realizou-se um estudo preliminar para avaliação do desempenho de um sistema DIRCM. Observa-se que a potência necessária para a obtenção de um determinado efeito (saturação ou *dazzling*) é diretamente proporcional ao quadrado do fator M^2 (qualidade do feixe) e inversamente proporcional ao quadrado da cintura inicial do feixe. As influências da atmosfera, do perfil de distribuição da intensidade, e da precisão do mecanismo de direcionamento, também são apresentadas, pois a energia irradiada no alvo poderá degradar consideravelmente em função da variação desses parâmetros. A Irradiância necessária para o *dazzling* apresenta-se como um dado indispensável para a visualização das influências das características de um feixe laser no desempenho de um equipamento DIRCM, e por isso, ao final, são propostos tópicos a serem investigados para a correta definição dessa densidade de potência.

Palavras-Chave— Medida de Ataque Eletrônico, Contramedida, Laser, DIRCM.

I. INTRODUÇÃO

Mísseis Infravermelho, especialmente os do tipo MANPADS (*Man-Portable Air-Defence System*), vêm se proliferando mundialmente, sendo hoje produzidos por 25 países [1]. O desenvolvimento de sensores avançados, em especial os do tipo FPA (*Focal Plane Array*), vem tornando as técnicas de contramedidas convencionais, em especial o *flare*, obsoletas.

Como forma de se contrapor a esse tipo de inovação, equipamentos denominados DIRCM (*Directed Infrared Countermeasure*), baseados em lasers, vêm sendo utilizados como um meio de proteção de aeronaves, causando os efeitos de despistamento, *dazzling* (cegamento ou saturação), dano permanente no sensor, ou destruição do míssil que constitui a ameaça [2].

Esses sistemas já se encontram operacionais em diversas Forças Aéreas, e no Brasil, a primeira a aeronave a ser equipada com esse tipo de tecnologia será o KC-390, que utilizará um equipamento J-MUSIC, da empresa Israelense ELBIT.

Conforme os experimentos realizados em [3], foi possível identificar a capacidade de interferência em sensores FPA InSb (Antimoneto de Índio) e FPA CMT (Cromo Mercúrio Telúrio). O foco desse experimento era o efeito *dazzling*, e foi observado uma saturação total do sensor com a irradiância de 1 W/m^2 .

Utilizando os dados do experimento acima citado, o objetivo deste trabalho é apresentar as influências das características de um feixe laser na efetividade de um DIRCM, bem como definir alguns parâmetros que devem ser observados em uma futura avaliação operacional. Ao final, também serão delimitados problemas que deverão ser investigados futuramente para uma análise criteriosa do desempenho desse tipo de equipamento.

II. MATERIAIS DE MÉTODOS

Os resultados de potência apresentados nas análises dos gráficos desta pesquisa são relacionados à potência inicial necessária (em função da distância) para a obtenção de uma irradiância de 1 W/m^2 , que foi a densidade encontrada em [3], e que induziu uma saturação total no sensor FPA do experimento. Denominamos essa potência necessária de: potência de *dazzling*.

Baseado nos dados disponíveis em [3]–[5], serão apresentadas as influências das seguintes características de um feixe laser:

- a relação entre o fator de qualidade do feixe (fator M^2) e a potência de *dazzling*, em função da distância de engajamento;
- a relação entre a potência necessária, o comprimento de onda e as atenuações atmosféricas;
- a influência da cintura inicial do feixe na potência necessária;
- a influência da distribuição de intensidade do feixe na efetividade do equipamento; e
- a influência da divergência na precisão do mecanismo de direcionamento do feixe.

Em virtude das múltiplas possibilidades de fenômenos que podem influenciar na propagação e no perfil de comportamento de um feixe laser, foram definidos os seguintes parâmetros para estudo:

Diego Alves Nunes, diegoalns@hotmail.com, +55-12-3947-6891, Vilson Rosa de Almeida, vilsonra@ita.br, +55-12-3947-5761.

- feixe monomodo TEM₀₀ (o perfil transversal de distribuição da intensidade se comporta como uma função Gaussiana);
- cálculo da transmitância atmosférica, utilizando o software MODTRAN5[®]. Foi escolhido o modelo atmosférico tropical, com as seguintes características ao nível do mar: pressão atmosférica de 1012,9 mb, visibilidade de 23 km, temperatura de 299 K, sensor do míssil a 0ft (nível do mar) e aeronave alvo com DIRCM a 1000 ft;
- fonte do equipamento laser operando no modo de onda contínua;
- laser CO₂ de frequência dobrada ($\lambda = 4,62 \mu\text{m}$);
- diâmetro (cintura) de saída do feixe de 20 mm;
- sensor FPA CMT 256 x 256 pixels; e
- irradiância necessária para máxima saturação do sensor FPA: 1 W/m².

Para se alcançar os objetivos citados, foi analisada a equação utilizada para se definir as variações axiais de um feixe laser em função da sua propagação numa direção z , dada por [5]:

$$W_x^2(z) = W_{0x}^2 + M_x^4 \left(\frac{\lambda}{\pi W_{0x}} \right)^2 (z - z_{0x})^2, \quad (1)$$

onde z é a distância longitudinal, $W_x(z)$ é a cintura do feixe na posição z , $M_x = M$ (fator de qualidade do feixe), e W_{0x} a cintura inicial do feixe.

Para grandes distâncias, (1) pode ser simplificada [4], tomando-se:

$$W_x(z) \cong \left(\frac{M_x^2 \lambda}{\pi W_{0x}} \right) (z - z_{0x}). \quad (2)$$

Para a cálculo da intensidade (irradiância), assumindo um feixe de perfil circular, temos:

$$I(z) = \frac{P_0}{\pi (W_{xz})^2}. \quad (3)$$

Com isso, a relação entre a potência necessária (P_0) para obtenção de determinada intensidade sobre o FPA em função da qualidade do feixe (M^2) e da distância (z), pode ser definida por:

$$P_0 = \pi I(z) (M^2)^2 \left(\left(\frac{\lambda}{\pi W_{x0}} \right) z \right)^2 \quad (4)$$

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a obtenção do efeito *dazzling*, já se conhecendo a irradiância necessária de $I(z) = 1 \text{ W/m}^2$, define-se o seguinte:

$$P_0 = \pi (M^2)^2 \left(\left(\frac{\lambda}{\pi W_{x0}} \right) z \right)^2 \quad (5)$$

Para a obtenção da potência que a fonte deve possuir (P_f), levando-se em consideração as perdas atmosféricas, tem-se a seguinte expressão:

$$P_f = \frac{P_0}{\tau} \quad (6)$$

Sendo τ a transmitância atmosférica calculada no MODTRAN5[®].

Para o estudo da distribuição transversal da intensidade, assumindo que o feixe apresenta o perfil TEM₀₀, temos que:

$$I(r) = I_0 e^{\left(\frac{-2r^2}{W_{xz}^2} \right)} \quad (7)$$

Sendo I_0 a intensidade no centro do feixe, ou seja, $I_0 = 1 \text{ W/m}^2$, e r a distância radial.

Para a análise da precisão necessária ao sistema de direcionamento de feixe, foi utilizada a seguinte expressão:

$$\theta = \frac{1}{2} \frac{W_{xz}}{z}, \quad (8)$$

onde θ é o ângulo de divergência do feixe, em radianos, e W_{xz} a cintura do feixe na distância z .

Sabendo-se que o alcance dos armamentos MANPADS envolvem uma distância de engajamento de 3,5 a 8 km [6], os cálculos foram conduzidos utilizando-se z variando de 0 a 10 km.

III. RESULTADOS E ANÁLISES

Utilizando-se (5), obtém-se o gráfico da Fig. 1, relacionando a potência necessária para saturação total do sensor citado (potência de *dazzling*, correspondente a uma irradiância de 1 W/m²) e a distância, para diferentes fatores M^2 , desconsiderando-se os efeitos atmosféricos.

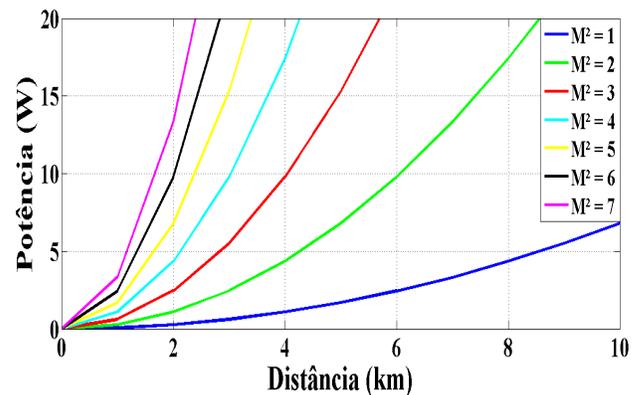


Fig. 1. Potência de *dazzling*, em função da distância, para diferentes valores de M^2 .

A Tabela I apresenta uma comparação da diferença da potência de *dazzling* em função do fator M^2 .

Tabela I: Comparação da potência de *dazzling* para uma distância de 4 km.

M^2	Potência (W)	Fator multiplicativo $M^2 = 1$
1	1,08	-
2	4,34	4x
3	9,78	9x
4	17,39	16x
5	27,17	25x
6	39,13	36x
7	53,26	49x

Observa-se que a potência de *dazzling* é diretamente proporcional ao quadrado do fator M^2 .

Agora, levando-se em consideração os efeitos atmosféricos (atenuação do feixe em função do comprimento de onda, devido ao efeito da temperatura, densidade e umidade atmosféricas), (5), (6) e $M^2 = 1$, foi obtido o gráfico da Fig. 2, que ilustra a diferença de potência de *dazzling* para dois comprimentos de onda diferentes: $4,62 \mu\text{m}$ e $3,90 \mu\text{m}$.

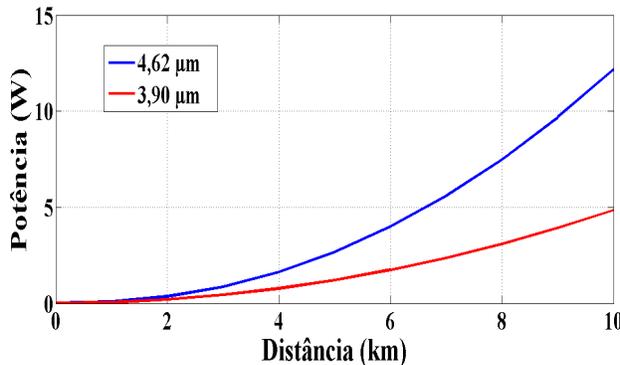


Fig. 2. Potência de *dazzling* para $M^2 = 1$ em função dos comprimentos de onda $\lambda = 4,62 \mu\text{m}$ e $\lambda = 3,90 \mu\text{m}$, considerando os efeitos atmosféricos.

No caso do equipamento utilizado em [3] (curva azul), existe uma ampliação do fator de acréscimo de potência com o aumento da distância, mostrando as desvantagens desse comprimento de onda em relação ao de $\lambda = 3,90 \mu\text{m}$.

Utilizando-se (5) e $M^2 = 1$, foi analisado na Fig. 3, a influência da cintura inicial do feixe (W_{x0}) na potência de *dazzling*.

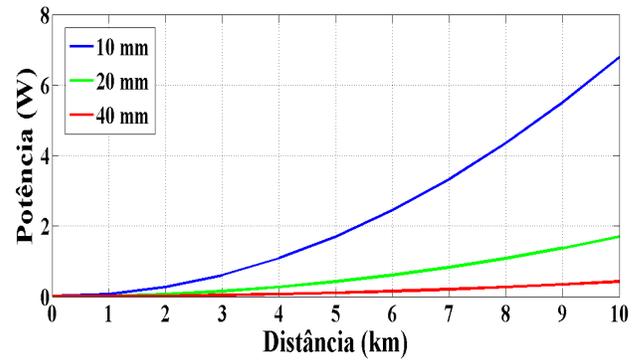


Fig. 3. Relação entre potência de *dazzling* e a cintura inicial do feixe laser.

Com isso, observa-se que o quadrado da cintura inicial do feixe é inversamente proporcional à potência a ser utilizada.

Deve-se, ainda, considerar o perfil de distribuição radial da intensidade do feixe, considerando-se o perfil do modo TEM_{00} (perfil transversal Gaussiano), pois uma análise de outros tipos de perfis de modo deve ser objeto de um estudo mais específico.

Assumindo-se o perfil de feixe Gaussiano, e utilizando-se (7), as curvas da Fig. 4 apresentam o comportamento desse feixe com diversas divergências, mantendo-se a intensidade central igual a 1 W/m^2 , o que implica em variação da potência de *dazzling*.

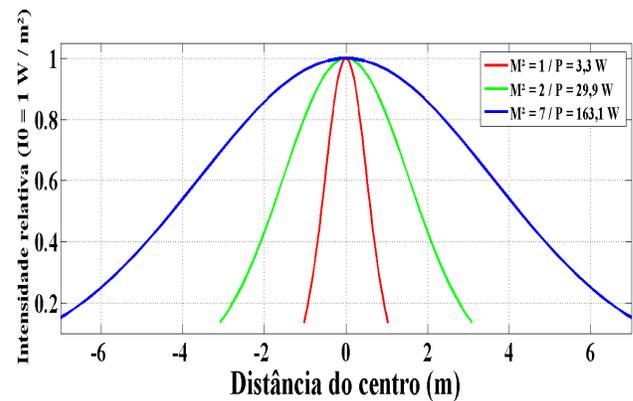


Fig. 4. Distribuição de intensidade do feixe laser a uma distância de 7 km.

Para esse tipo de distribuição, qualquer variação radial da ordem de 50% da cintura do feixe implica em uma redução de 50% da irradiância incidente no sensor do míssil.

Com isso, podemos concluir que, o tipo de distribuição que um feixe laser apresenta é fator primordial na correta definição da efetividade de um equipamento DIRCM.

Outra característica importante que deve ser observada é a precisão do equipamento que direciona o feixe; para melhor visualizarmos esse fenômeno, utilizamos os dados da Fig. 4 e (8) para compor a Tabela II, que apresenta o desvio angular, em μrad , necessário para que haja uma redução de 50% da irradiância incidente.

TABELA II : DESVIO ANGULAR, EM μ RAD, PARA UMA REDUÇÃO DE 50% DA INTENSIDADE NO ALVO, A UMA DISTÂNCIA DE 7 KM.

M^2	Cintura do Feixe (m)	Desvio angular(μ rad)
1	1,02	72
3	3,08	220
7	7,20	514

Apesar do feixe com $M^2 = 1$ possuir uma qualidade de propagação superior em termos de divergência, ele apresenta uma menor tolerância a desvios do sistema de direcionamento.

A partir dos resultados apresentados, observa-se a ampla influência exercida pelas características de um equipamento laser, o que nos permite estabelecer as características que, obrigatoriamente, devem ser observadas na avaliação da efetividade de um equipamento DIRCM:

- comprimento de onda;
- diâmetro de saída do feixe;
- qualidade do feixe (M^2);
- perfil de distribuição da intensidade do feixe; e
- precisão do mecanismo de direcionamento de feixe.

Contudo, o dado mais importante, que possibilitou a obtenção dos gráficos estudados, foi a irradiância necessária para se produzir o efeito desejado, no caso analisado, o *dazzling* (1 W/m^2).

Para a obtenção dessa informação, primeiramente deve-se conhecer detalhadamente o mecanismo utilizado pelo sensor (*e.g.*, retículo, pseudo-imageador e imageador espectral), para que se possa estabelecer o tipo de interferência a ser realizada (*i.e.*, "em banda" ou "fora de banda") [2]. Após, definir qual o objetivo desejado no míssil a ser impactado, a saber: despistamento, saturação, dano permanente do sensor ou destruição do míssil [2]; essa definição influencia diretamente na potência a ser utilizada.

Devido ao amplo número de informações que devem ser compiladas, a definição da irradiância necessária para um determinado objetivo é um assunto que deve ser objeto de estudos muito mais aprofundados, pois envolvem sistemas de mísseis complexos, com tecnologias e gerações diferentes.

Vale ressaltar que, o estudo dos efeitos atmosféricos em climas diferentes também é necessário, pois a variação da umidade e da temperatura poderão influenciar na propagação de um feixe laser, alterando o coeficiente de extinção.

IV. CONCLUSÃO

Com base nas expressões utilizadas para o cálculo do comportamento de um feixe laser, foi possível observar a direta proporcionalidade da potência necessária com o quadrado do fator M^2 , e sua inversa relação com o quadrado da cintura inicial do mesmo. Também foi apresentado a influência que a atmosfera apresenta para diferentes comprimentos de onda, agravando-se com o aumento da distância.

Conforme visto, a definição do perfil de intensidade e a precisão do mecanismo de direcionamento tornam-se obrigatórias, pois caso esses detalhes não sejam observados, erros de posicionamento do feixe no alvo poderão gerar uma diminuição dos efeitos ou até mesmo a sua extinção.

Com esses dados, ainda que de caráter preliminar, foi possível definir os fatores que devem ser observados, e identificado o principal parâmetro a ser encontrado antes do início de uma avaliação operacional, ou seja, a irradiância necessária para a obtenção do efeito desejado em um dado objetivo.

REFERÊNCIAS

- [1] A. D. McAulay, *Military Laser Technology for Defense: Technology for Revolutionizing 21st Century Warfare*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] D. H. Titterton, "Development of infrared countermeasure technology and systems," in *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics*, vol. 118, A. Krier, Ed. Springer London, 2006, p. 635–671.
- [3] R. H. M. A. Schleijsen, A. Dimmeler, B. Eberle, J. C. van den Heuvel, A. L. Mieremet, H. Bekman, and B. Mellier, "Laser dazzling of focal plane array cameras," in *Optics/Photonics in Security and Defence, 2007*, p. 67380O–67380O–10.
- [4] O. Svelto, *Principles of lasers*, 5th ed. New York: Springer, 2010.
- [5] A. E. Siegman, "Defining, measuring and optimizing laser beam quality," in *OE/LASE'93: Optics, Electro-Optics, & Laser Applications in Science & Engineering*, 1993, p. 2–12.
- [6] J. G. Sliney, "Ground-based laser/optical counter measure Anti-MANPADS," in *24th Digital Avionics Systems Conference*, vol. 2, p. 9.C.4–1–9.C.4–6.