

## A Relação entre a Resolução Radiométrica e a Resolução Espacial na Faixa do Infravermelho Termal

ANTONIO FREDERICO BASTOS

CTA/IEAV – Centro Técnico Aeroespacial/ Instituto de Estudos Avançados  
Rod. Dos Tamoios, Km 5,5 – 12228-840-São José dos Campos – SP, Brasil  
bastosaf@ieav.cta.br

**Abstract** The geometric and radiometric resolutions of a thermal Linescan was determined and its relationship was established. The geometric resolution was determined through the *MTF* (Modulation Transfer Function). The radiometric resolution was obtained from laboratory experiments where a *NETD* (Noise Equivalent Temperature Difference) was determined. By analyzing the resolution relationship, a new parameter, *NETD\** was proposed to describe it

**Keywords** : Linescan, resolution, thermal infrared

### Introdução

Um sistema imageador infravermelho termal de varredura de linha (IRLS-Infrared Linescan) é um dispositivo capaz de coletar, detectar e transduzir a radiação infravermelho termal emitida pelos alvos, sob a plataforma na qual está instalado e gerar uma imagem correspondente. Esta imagem é formada mediante um prisma rotativo que realiza a varredura de faixas transversais à direção de vôo e pelo deslocamento da plataforma que, sincronizado com a frequência de varredura, propicia a justaposição das faixas varridas, formando, desse modo, uma imagem contínua da cena sobrevoada.

Na varredura transversal, o sinal é formado por um processo de convolução e, na justaposição longitudinal, por um processo de amostragem, cuja taxa é ditada pela velocidade da plataforma. Quando a imagem é gravada em modo digital, esta digitalização, por suas características, torna o processo de convolução da varredura transversal também num processo de amostragem.

Considerando que as frequências de amostragem estão dentro dos limites ditados pelo Teorema da Amostragem (Nyquist), é razoável admitir-se o sistema como sendo linear e conseqüentemente poder-se caracterizá-lo por sua Função de Transferência.

Assim, a resolução espacial ou geométrica é obtida a partir da determinação da Função de Transferência de Modulação (*MTF* - Modulation Transfer Function). A resolução radiométrica pode ser determinada teoricamente e a partir de experimentos de laboratório.

Conhecidas as duas resoluções considera-se caracterizado o sistema. Entretanto, sabe-se que estas resoluções são inter-relacionadas, assim, além da obtenção independente de cada uma, é importante o conhecimento desta inter-relação para uma caracterização mais completa.

### Determinação da Resolução Espacial

Calculam-se as *MTF* dos diversos subsistemas, os quais são individualizados pela natureza da excitação e resposta e pelos diferentes argumentos de suas funções de transferência. Assumindo o sistema como sendo linear, efetua-se a produto das *MTF* parciais, obtendo-se a *MTF* do sistema.

$$MTF_{sistema} = (MTF)_1 \times (MTF)_2 \times (MTF)_3 \times \dots \times (MTF)_n \quad (1)$$

A *MTF* também pode ser estimada a partir da exploração de estruturas geométricas e radiométricas de elementos da imagem, com propriedades identificáveis ou resultantes de alvos artificiais com parâmetros predeterminados.

Assim, pode-se utilizar uma descontinuidade para representar uma função impulso ou uma variação abrupta de contraste para representar uma função degrau.

Uma cena e sua imagem, obtida por um sensor, relacionam-se pela equação:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (2)$$

onde  $f(x, y)$  é a função de entrada, representativa da cena,  $h(x, y)$  é a função de espalhamento pontual (Point Spread Function – PSF) e  $g(x, y)$  é a função representativa da imagem. A utilização de elementos da cena que simulem uma função impulsiva,  $f(x, y) = \mathbf{d}(x, y)$  (Dirac) é o processo mais direto, uma vez que, neste caso, a resposta do sistema é diretamente proporcional a  $h(x, y)$ .

### Determinação da Resolução Radiométrica

Um dos parâmetros comumente utilizados para determinar a resolução radiométrica, particularmente para imageadores de varredura de linha, é a *NETD* (Noise Equivalent Temperature Difference). A *NETD* pode ser obtida por meio de cálculo teórico pela equação:

$$NETD = \frac{Ad^{1/2} \times \Delta f^{1/2}}{\frac{\rho}{4} a^2 A_o \int_0^\infty D^*(l) \frac{dL(l)}{dT t_o d_l}} \quad (3)$$

Onde:

$Ad$  = Área do detetor ( $cm^2$ )

$\Delta f$  = Largura de faixa eletrônica (Hz)

$a$  = IFOV (rad)

$A_o$  = Área da óptica ( $cm^2$ )

$D^*$  = Detetividade ( $Hz^{1/2} cm W^{-1}$ )

$t_o$  = Eficiência óptica

$L = \text{Radiância (Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{)}$

$R = \text{Temperatura (K)}$

Pode-se também determinar a *NETD* de um sensor por meio de experimentos nos quais estima-se a razão sinal-ruído utilizando um alvo com temperatura e/ou emissividade diferente do fundo, pela equação 1.4, onde  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre o alvo e o fundo,  $V_s$  é o sinal de resposta e  $V_n$  é o ruído.

$$NETD = \frac{\Delta T}{V_s / V_n} \quad (1.4)$$

### A Inter-relação das Resoluções Espacial e Radiométrica

Na imagem de um alvo retangular sempre haverá uma degradação das bordas, provocada pela *MTF* do sistema, que age reduzindo a amplitude das componentes de alta frequência. Esta degradação das bordas, para um alvo de dimensões próximas do IFOV do sensor, implica numa drástica redução da amplitude do sinal. Para minimizar esta redução de amplitude, recomenda-se que, na determinação da *NETD*, sejam utilizados alvos de grandes dimensões (várias vezes o tamanho do pixel), bem como um  $\Delta T$  muito maior que a *NETD* esperada, para garantir um sinal maior que o ruído e assegurar uma boa resposta do sistema. Nestas recomendações fica implícito o relacionamento entre a *MTF* e a *NETD*, assim, na caracterização de um sensor infravermelho, onde se busca o conhecimento destes parâmetros, é importante que se considere esta inter-relação.

Verifica-se que, um parâmetro que representasse a resolução radiométrica e que levasse em conta a influência da *MTF*, seria bastante útil, principalmente na avaliação de sensores de desempenho muito próximos.

Propõe-se, então, uma nova *NETD* como função da dimensão do alvo, que será designada como *NETD\**.

Sejam,  $f_o$  uma função de entrada (função objeto) e  $f_i$ , a função resposta do sensor a esta entrada (função imagem). Designando  $f_i(\Delta x \rightarrow \infty)$  como a resposta do sensor a uma entrada  $f_o$ , que é produzida por um alvo de dimensão extremamente maior que o pixel ou elemento de resolução do sensor, a equação 1.2 pode ser escrita:

$$f_i(\Delta x \rightarrow \infty) = f_o * h \quad (1.5)$$

e, para este sinal pode-se reescrever a equação 1.4:

$$NETD = \frac{\Delta T}{f_i(\Delta x \rightarrow \infty) / V_n} \quad (1.6)$$

O novo parâmetro *NETD\** é então definido pela equação:

$$NETD^* = \frac{\Delta T}{f_i(\Delta x) / V_n} \quad (1.7)$$

Neste caso tem-se:

$$NETD^* = NETD(\Delta x) \quad (1.8)$$

e  $f_i(\Delta x)$  é o sinal de resposta do sistema, como função da largura do pulso de entrada.

A nova função  $NETD^*$ , pode ser relacionada com a  $NETD$ , comparando-se as equações 1.6 e 1.7 e estabelecendo-se a seguinte igualdade:

$$NETD^* = \frac{NETD}{A(\Delta x)} \quad (1.9)$$

Onde  $A(\Delta x)$  é a amplitude máxima do sinal, dada por:

$$A(\Delta x) = \frac{f_i(\Delta x)}{f_i(\Delta x \rightarrow \infty)} \quad (1.10)$$

Para estabelecer esta nova função utilizou-se um imageador infravermelho termal, cuja  $MTF$  é apresentada graficamente na **Figura 1**, abaixo e cujas resoluções, espacial e radiométrica são, respectivamente 40cm e 1 K.

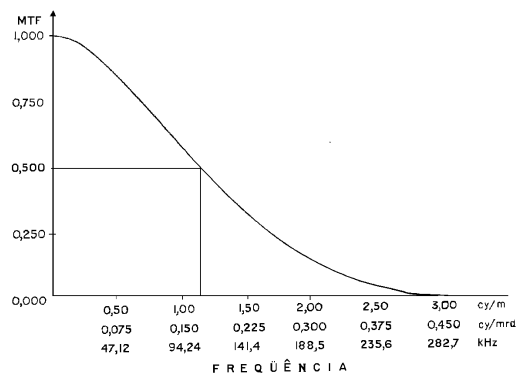


Figura 1 – MTF teórica do sistema.

Em seguida, tomaram-se diferentes larguras para os pulsos de entrada, representando alvos de diferentes dimensões, de modo a se obterem diversos valores para  $f_i(\Delta x)$ . Simulou-se, então, a aplicação, no sistema, de 7 funções pulso, com a largura ( $\Delta x$ ) de 20 pixels, 10 pixels, 5 pixels, 2.5 pixels, 1.25 pixel, 0,5 pixel e 0.25 pixel, equivalentes, respectivamente a alvos de

largura de 8 m; 4 m; 2 m; 1m; 0.5 m; 0,2 m; 0.1 m. Na **Figura 3** são mostradas, graficamente, alguns dos pulsos simulados e as respectivas respostas, normalizadas para a unidade.

Estas respostas foram obtidas do seguinte modo: inicialmente calculou-se a transformada de Fourier de cada função de entrada, definida por 4 amostras por pixel, utilizando-se um programa para cálculo da FFT (Fast Fourier Transform) em um computador tipo PC e após o cálculo multiplicou-se cada função resultante, agora no domínio da frequência, pela *MTF* do sistema. Finalmente calculou-se a transformada inversa de Fourier (FFT)<sup>-1</sup> das funções resultantes do produto, obtendo-se as respectivas respostas.

A **Figura 2** mostra, graficamente, a seqüência de passos para obtenção da resposta do sistema, descrita acima.

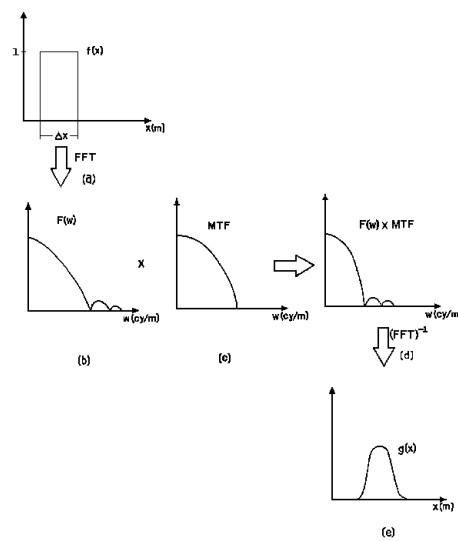


Figura 2 – Seqüência da obtenção da resposta do sistema, sendo pulso de entrada (a), espectro do pulso de entrada (b), MTF teórica do sistema (c), produto do espectro da função de entrada pela MTF (d) e resposta do sistema (e).

Os valores das respostas estão apresentados na **Tabela 1**.

TABELA 1 – AMPLITUDE DO SINAL DE RESPOSTA

Dimensão do alvo		Resposta
$\Delta x$ (m)	$\Delta x$ (pixel)	$f_i(\Delta x)$
8	20,0	0,9872
4	10,0	0,9843
2	5,00	0,8763
1	2,50	0,6787
0,5	1,25	0,4252
0,2	0,50	0,1915
0,1	0,25	0,0999

Para valores normalizados, observa-se que  $f_i(\Delta x \rightarrow \infty)$  tende para a unidade quando  $\Delta x$  tende para o infinito e, neste caso,  $f_i(\Delta x) = A(\Delta x)$ .

Substituindo os diversos valores obtidos para  $f_i(\Delta x)$ , (Tabela 1), na equação 1.9, calculam-se os valores da  $NETD^*$ , mostrados na **Tabela 2**.

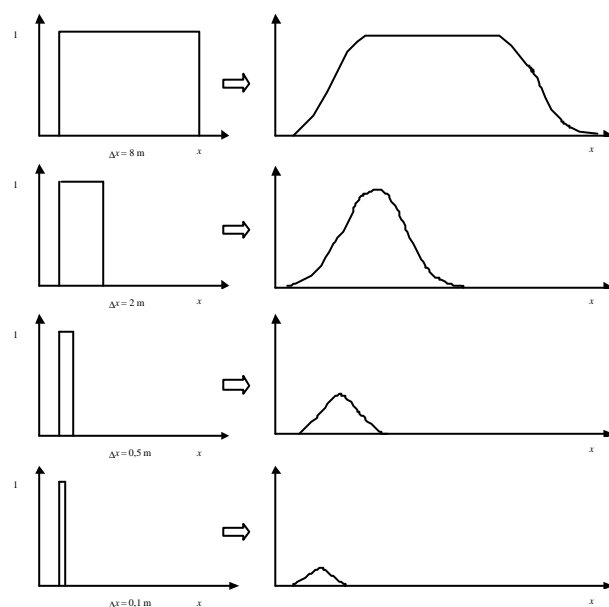


Figura 3 – Pulso de entrada e respectiva resposta do sistema.

TABELA 2 – NETD EM FUNÇÃO DA DIMENSÃO DO ALVO.

Dimensão do alvo		$NETD (^{\circ}C)$
$\Delta x$ (m)	$\Delta x$ (pixel)	
8	20,0	1,013
4	10,0	1,016
2	5,00	1,142
1	2,50	1,473
0,5	1,25	2,352
0,2	0,50	5,222
0,1	0,25	10,010

Utilizando os dados da **Tabela 2** e a  $NETD = 1K$ , obtida convencionalmente mediante a equação 1.3, pode-se construir o gráfico da **Figura 4**, onde, no eixo das abscissas, tem-se a

dimensão lateral do alvo e no eixo das ordenadas, tem-se a

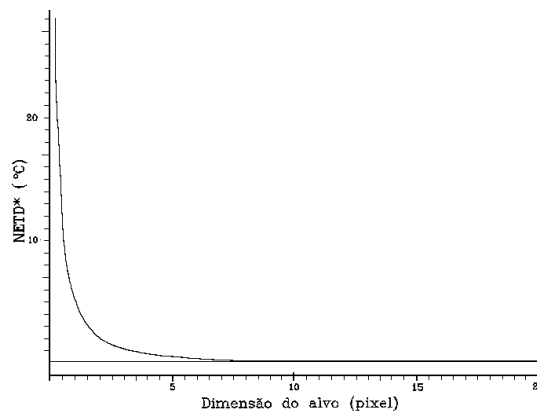


Figura 4 – NETD em função da dimensão do alvo.

Observa-se, na **Figura 4**, que a função  $NETD^*$  é definida por uma curva que se aproxima assintoticamente do eixo das ordenadas e da reta que representa a  $NETD$ . O ramo horizontal define a resolução radiométrica para um alvo cuja dimensão tende ao infinito e cuja diferença de temperatura, em relação ao fundo, tende à  $NETD$ . O ramo vertical define a resolução espacial para um alvo, cuja dimensão tende a zero e cuja diferença de temperatura, em relação ao fundo, tende ao infinito.

O comportamento desta curva é indicação do desempenho do sistema, consideradas as duas resoluções.

Assim, para dois sistemas imageadores em avaliação, aquele cuja curva decresça mais rapidamente ou aquele cuja curva, assintoticamente, mais se aproxime da ordenada e da reta horizontal que representa a *NETD*, terá melhor desempenho.

### **Conclusão**

O desempenho de um sistema imageador infravermelho tem sido determinado mediante modelos que incluem parâmetros importantes e fundamentais como a *NETD* e a *MRTD* (Minimum resolvable temperature difference). Este último é um parâmetro subjetivo, desenvolvido pelo CNVEO (Center for Night Vision and Electro-Optics) para caracterização de imageadores de visada frontal (FLIR).

O desenvolvimento atual de imageadores utilizando redes de plano focal e o processamento digital de imagens têm despertado o interesse em pesquisar e desenvolver processos de caracterização mais eficientes. Este trabalho insere-se nesse contexto e pretende contribuir com uma abordagem mais abrangente no processo de avaliação de desempenho de sensores termais de varredura de linha.

### **Referências**

- Anuta,P.E.; Bartolucci,L.A.; Dean, M. E.; Lozano,D.F.; Malaret,E.M.; Mcgillem,C.D.; Valdes,J.A.; Valenzuela,C.R. Landsat 4 MSS and Thematic Mapper data quality and information content analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 22(3):222-236, Mai. 1984.
- Bastos,A.F. **A Inter-relação das resoluções espacial e radiométrica na faixa do infravermelho termal**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 1989. (4860-TDL/371).
- Carnahan,W.H.; Zhou,G. Fourier transform techniques for the evaluation of the Thematic Mapper line spread function. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, 52(5):639-648, Mar,1986.
- Goodman,I.A. **Introduction to Fourier optics**. New York, McGraw-Hill, 1968.
- Lloyd,J.M. **Thermal Imaging Systems**. New York, Plenum, 1975.
- Malaret,E.R. **Methods of image restoration for incoherent and coherent systems**. Phd Thesis, Purdue university, West Lafayette, IN. 1985.