

利用 NETD 和探测器测试数据计算红外成像系统扫描效率

王忆锋, 毛京湘

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 红外成像系统的扫描效率 η 与系统的噪声等效温差 (NETD) 有关。利用 NETD 的理论公式以及探测器的测试结果, 例如相对光谱响应、黑体探测率等, 可以导出另外一种计算 η 的表达式, 其中的光谱积分项容易利用 MATLAB 提供的样条函数命令做数值积分求解。该表达式也许可以作为扫描效率 η 的一种间接测试方法。

关键词: 扫描效率; 噪声等效温差; 相对光谱响应; 红外成像系统

中图分类号: O472

文献标识码: A

Computation of Scan Efficiency of Infrared Imaging System with NETD and Test Data of Detector

WANG Yi-feng, MAO Jing-xiang

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Scan efficiency η of infrared imaging system is related with the noise equivalent temperature difference (NETD) of the system. Another kind of expression of η can be derived from NETD theoretical formula and test data of detector such as relative spectral response, blackbody detectivity and et al, in which the spectral integration can be solved easily by doing numerical integration with spline function commands provided in MATLAB. This expression may be used as an indirect testing method of scan efficiency η .

Key words: scan efficiency; noise equivalent temperature difference; relative spectral response; infrared imaging system

1 引言

扫描效率 η 是光机扫描型红外成像系统的基本参数之一, 它出现在噪声等效温差 (NETD) 的理论计算公式中。因为涉及参数较多, 红外成像系统的扫描效率 η 有时不易测试。同时, NETD 是一个可测量的参数。根据 NETD 的理论计算公式和测试结果, 以及探测器的测试数据, 例如相对光谱响应、黑体探测率等, 可以写出扫描效率 η 的另外一种表达式, 该公式或许可以视为 η 的一种间接测试方法。

2 扫描效率的定义

观察视场完成一次扫描所需的时间与扫描机构

实际扫描一周所需的时间之比称为扫描效率 η 。通常空间扫描是由水平扫描和俯仰扫描合成的, 故扫描效率又有水平扫描效率 η_H 和俯仰扫描效率 η_V 之分, 并有:

$$\eta = \eta_H \eta_V \quad (1)$$

扫描效率 η 又可以定义为:

作者简介: 王忆锋 (1963 -), 男, 工学学士, 高级工程师, 2000 年 8 月 ~ 2001 年 6 月在美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者。目前主要从事器件仿真研究。E-mail: wangyifeng63@sina.com

收稿日期: 2008-05-05

$$\eta = \frac{T_f - T_f'}{T_f} \quad (2)$$

其中, T_f 为帧周期; T_f' 为空载时间。

对于凝视型红外成像系统而言, 与扫描效率对应的参数是帧时效率, 其定义为:

$$\eta = \frac{\text{行程时间总和}}{T_f} \quad (3)$$

上面只是扫描效率的一般定义。不同的扫描部件, 如摆动平面反射镜、旋转多面反射镜等, 依据相应的结构参数, 可以写出各种结构下扫描效率 η 的具体计算公式^[1]。

3 以 NETD 和探测器光谱响应测试数据表达的扫描效率

等效噪声温差 (NETD) 是表征红外探测器受客观信噪比限制的分辨率的一种量度。实际测量时, NETD 按下式计算:

$$\text{NETD} = \frac{V_{\text{rms}}}{\Delta V / \Delta T} \quad (4)$$

式中, V_{rms} 是噪声电压的均方根值; ΔV 是目标与背景之间温差为 ΔT 时目标信号与背景信号之差。根据式(4)可以推导出与光谱积分有关的 NETD 计算公式^[1-5]。当系统工作波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 时, 对于单元扫描、多元扫描、多元并扫并行传输及凝视方式, 有^[1]:

$$\text{NETD} = \frac{\pi^{3/2} F \sqrt{W_H W_V}}{2 \sqrt{\eta} \sqrt{N} \sqrt{T_f} \alpha \beta A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) D_\lambda^*(\lambda) \frac{\partial M(T_B)}{\partial T} d\lambda} \quad (5)$$

式中, F 为光学系统的焦距; A_0 为光学系统入瞳面积; T_f 为帧周期; W_H 和 W_V 分别为由光机扫描机构偏转角及视场光阑决定的水平方向观察视场角和俯仰方向观察视场角; α 和 β 为瞬时视场的平面角。对于单元扫描及凝视方式, 有 $N=1$; 对于由 m 个探测器构成的多元并扫多路转换方式, 只需要将式(5)中的 $1/\sqrt{N}$ 改为 $\sqrt{m}$ 即可。 $\partial M(\lambda, T_B)/\partial T$ 称为热导数, 它是普朗克函数。

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \quad (6)$$

对温度求导数的结果, 即:

$$\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T^2} \cdot \frac{\exp(c_2/\lambda T)}{[\exp(c_2/\lambda T) - 1]^2} \quad (7)$$

式中, c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐射常数。

$\tau_0(\lambda)$ 为光学透过率, 实际中一般由一组离散的测试值给出。例如, 根据一组 (1801 对) 测试数据画出的某种光学材料的光谱透过率 $\tau_0(\lambda)$ 曲线如图 1 所示。

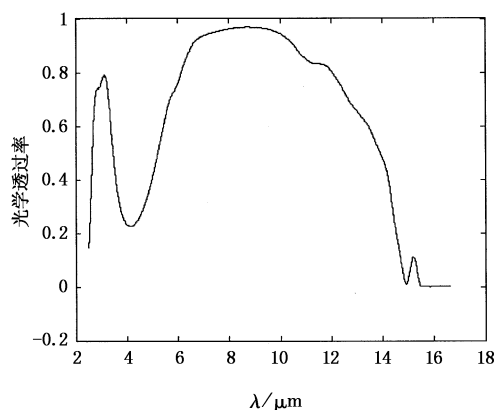


图1 一种光学材料的光谱透过率测试曲线 $\tau_0(\lambda)$

另外, 式(5)中的 $D_\lambda^*(\lambda)$ 为归一化光谱探测率, 它是单色波长的函数, 实际中不易直接测量, 一般由相对光谱响应 $S(\lambda)$ 和黑体探测率 $D_B^*(T_B)$ 的测试值间接导出。例如, 一个长波 HgCdTe 焦平面探测器在 77K 工作温度下相对光谱响应测试数据 $S(\lambda_i)$ 如表 1 所示。

表1 长波 HgCdTe 焦平面探测器在 77K 工作温度下相对光谱响应测试数据

波长 λ_i	测试值 $S(\lambda_i)$	波长 λ_i	测试值 $S(\lambda_i)$	波长 λ_i	测试值 $S(\lambda_i)$
7	0	8.4	0.79	9.8	1
7.2	0	8.6	0.81	10	0.93
7.4	0	8.8	0.82	10.2	0.78
7.6	0.05	9	0.83	10.4	0.54
7.8	0.45	9.2	0.86	10.6	0.35
8	0.74	9.4	0.89	10.8	0.17
8.2	0.77	9.6	0.95	11	0

$D_\lambda^*(\lambda)$ 与 $S(\lambda)$, $D_B^*(T_B)$ 之间有下列关系^[6-7]:

$$\frac{D_\lambda^*(\lambda)}{D_B^*(T_B)} = gS(\lambda) \quad (8)$$

其中, g 因子定义为:

$$g = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) [M(\lambda, T_2) - M(\lambda, T_1)] d\lambda} \quad (9)$$

式中, σ 为斯蒂芬-波耳兹曼常数; T_1, T_2 为已知黑体温度。于是有:

$$D_A^*(\lambda) = g D_B^*(T_B) \cdot S(\lambda) \quad (10)$$

式中, $D_B^*(T_B)$ 为一个常数值。根据上述各式可以写出:

$$\eta = \left[\frac{\pi^{3/2} F \sqrt{W_H W_V}}{2 \text{NETD} \cdot \sqrt{N} \cdot \sqrt{T_f} \cdot \alpha \beta A_0 \cdot \sigma(T_2^4 - T_1^4) D_B^*(T_B)} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) [M(\lambda, T_2) - M(\lambda, T_1)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) S(\lambda) \frac{\partial M(T_B)}{\partial T} d\lambda} \right]^2 \quad (11)$$

可以看出, 式(11)的重点在于其中两个光谱积分项的计算。样条函数如三次样条函数、B 样条函数在数值积分中具有比较突出的优点, 特别是 B 样条函数即使在给定数据较稀疏的情况下也能得出精度较高的结果^[5]。利用 MATLAB 插值工具箱提供的样条函数计算上述两个光谱积分项, 具有编程简易、使用快捷、精度较高等特点, 其计算可以下例说明。

对于式(11)中分子积分项的计算, 可按下述步骤计算:

(1) 将两个不同黑体温度下的普朗克函数式(8)按照表 1 中波长值离散化, 再求出差值;

(2) 将差值与表 1 中的相对光谱响应测试数据相乘;

(3) 利用 MATLAB 样条插值工具箱提供的样条函数例如三次样条函数、B 样条函数做数值积分^[8-9], 即可求出该项积分的值。

对于式(11)中分母积分项的计算, 因为 $\tau_0(\lambda_i)$ 的数据密度大于相对光谱响应 $S(\lambda_i)$ 测试数据的密度, 因此较为简单的一种方法是:

(1) 利用 MATLAB 提供 polyfit() 函数对相对光谱响应波长范围内 (本文中为 $7 \sim 11 \mu\text{m}$) $\tau_0(\lambda_i)$

的测试数据 (计有 509 对) 做多项式拟合;

(2) 用 polyval() 函数求出在相对光谱响应测试波长 (λ_i) 处的值 $\tau_0(\lambda_i)$;

(3) 根据测试波长 (λ_i), 按照式(7)将热导数离散化, 并乘以 $S(\lambda_i)$ 和 $\tau_0(\lambda_i)$;

(4) 利用样条函数命令, 做数值积分, 即可求出该积分项的值。

4 结 论

扫描效率 η 是光机扫描型红外成像系统的基本参数之一, 对它进行直接测试有时可能有一定的工作量或难度。系统的 NETD、探测器黑体探测率等性能指标已成为常规测试, 根据这些参数, 利用本文所述结果计算扫描效率 η 或许可视为一种间接测试方法, 可与 η 的理论计算值进行比较。

致 谢: 作者对王乔方高级工程师提供的帮助表示感谢。

参考文献:

- [1] 杨宜禾, 岳敏, 周维真. 红外系统[M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] M C Dudzik. Infrared & electro-optical systems handbook: Electro-optical systems design, analysis, and testing [M]. SPIE Optical Engineering Press, Vol(4), 1993.
- [3] E L Dereniak, G D Boreman. Infrared detectors and systems[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [4] S B Campana. Infrared & electro-optical systems handbook: Passive electro-optical systems [M]. SPIE Optical Engineering Press, Vol(5), 1993.
- [5] Gerald C Holst. Testing and evaluation of infrared imaging systems[M]. JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [6] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [7] 毛京湘, 庄继胜. 红外焦平面探测器性能参数测量中 g 因子的计算[J]. 红外, 2008, 29(4): 9-11.
- [8] 任玉杰. 数值分析及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [9] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.