

# 凝视热成像系统 MTF 测试技术分析

房红兵 尹宝全 皮德富

TN214.06

(南京理工大学电子工程与光电技术学院光电技术系, 江苏·南京, 210094)

**摘要** 概述了目前进行凝视热成像系统 MTF 测试的几个主要方法, 着重分析了其中的斜缝法和激光散斑法各自解决问题的的工作原理、技术特点及技术关键, 指出, 对于凝视热成像系统的 MTF 测试, 这是两种比较值得研究和推广的技术。

**关键词** 调制传递函数, 凝视热成像系统, 线扩展函数, 斜缝法, 激光散斑。

红外成像系统

## 引言

调制传递函数(MTF)是评价红外热成像系统性能的一个重要参数, MTF 用来表征扫描成像系统的性能已多年, 其测试方法一般是采用线目标作为输入函数, 通过求系统对该目标响应的傅里叶变换获得, 此即所谓的线扩展函数法, 但是凝视热成像系统的工作原理与扫描系统有着本质的区别, 凝视热成像系统采用凝视器件成像, 凝视器件成像存在固有的混淆和不等晕现象, 使得其不能正确的再现输入的狭缝目标, 为了准确测试凝视热成像系统的 MTF, 小于 Nyquist 频率的混淆部分必须去除。

目前解决这个问题现行的 MTF 测试技术主要是改进线扩展函数法<sup>[1~4]</sup>和随机空间目标法, 前者是传统扫描型成像系统 MTF 测试技术的改进, 后者主要是利用激光散斑技术<sup>[6~8]</sup>, 本文对这几种方法作了详细研究, 分析了它们各自的技术途径和技术特点。

## 1 方法分析

### 1.1 改进线扩展函数法

传统线扩展函数法不能直接用于测试凝视热成像系统 MTF 的原因在于凝视探测器对线目标象的采样频率受到其单个探测元尺寸的限制, 实际是受到采样点数的限制, 如果能够采取适当的方法降低探测器对线目标象的采样间隔, 增加采样点数, 从而提高系统的 Nyquist 频率, 就可减小甚至消除可能引起的混淆部分, 改进线扩展函数法正是基于这样的数学原理, 常用的改进线扩展函数法有: 最值法<sup>[1~2]</sup>、扫描法<sup>[1~2]</sup>、斜缝法<sup>[2,4]</sup>。

**最值法:** 它先将缝靶目标垂直置于某一系列探测元的正中间, 此时测得的 MTF 是所有 MTF 中的最大值, 然后把缝目标置于两列探测元的正中间, 此时测出的 MTF 即为最小值, 最后将最大值和最小值求平均即为该系统的 MTF, 最值法测试方框图如图 1 所示。

**缝扫描法:** 可以认为这是传统线扩展法用于凝视热成像系统 MTF 测试的推广, 其实质是先对狭缝目标进行扫描, 则狭缝的像将沿探测器的某一系列移动, 从探测器某一系列元上得

到的信号便记录了每一狭缝位置,利用这种方法得到的 LSF 即可求出 MTF. 这种方法也可进一步改进成平均法,即测出狭缝位于探测元不同位置时的 MTF,最后求平均,但是要求狭缝每次在探测元面上移动的距离相等,该测试法如图 2 所示.

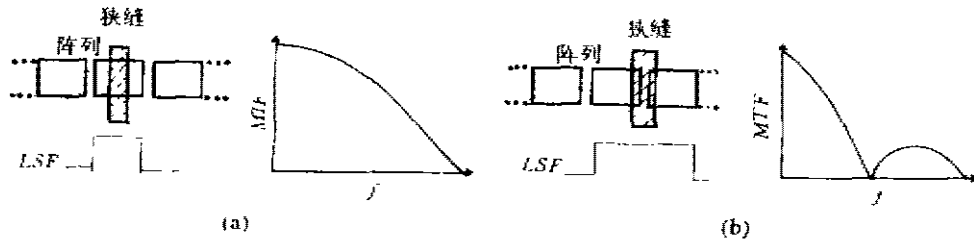


图 1 最值法示意图  
(a) 测得最大 MTF 时的狭缝位置 (b) 测得最小 MTF 时的狭缝位置

Fig. 1 FTmax/FTmin method  
(a) Slit position giving maximum MTF (b) Slit position giving minimum MTF

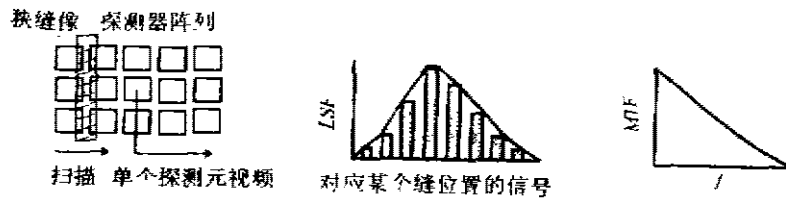


图 2 缝扫描法示意图  
Fig. 2 Scanning slit method

斜缝法:把狭缝相对于垂直方向略做倾斜,其过程如图 3 中(a)(b)所示.图 3(b)的实质就是相当于把垂直于探测器的狭缝沿水平方向在一个探测元上等间隔移动了 5 次,这就相当于把采样频率提高了 5 倍,其结果也等同于对这 5 次移动每次得到的 MTF 求平均值.

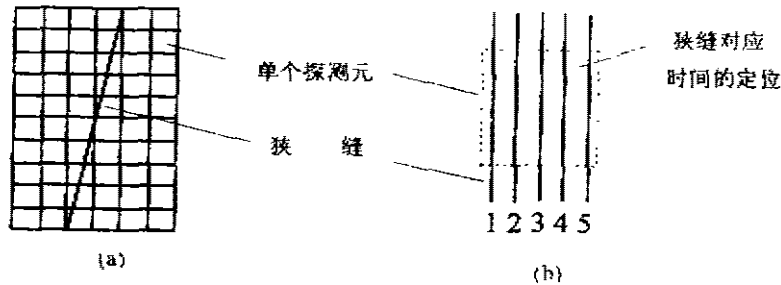


图 3 斜缝法示意图  
Fig. 3 Canted slit method

对最值法,必须让狭缝位于某一探测元列正中间和两列探测元的正中间;对缝扫描法,必须确定用某一探测元对狭缝目标进行扫描.为达到此目的,都必须采用一定的定位装置来精确控制狭缝相对于探测元的位置关系,这是这两种方法成功的关键,也是技术上的难点.斜缝法则不存在这个问题,把原本垂直的狭缝,在不知其与探测器阵列位置相对关系的情况下,如果想把狭缝按上面的思路覆盖  $N$  个探测元,把狭缝按公式  $\theta = \arctan(1/N)$  倾斜一个

很小的角度  $\theta$ , 具体狭缝到底在哪列探测元的覆盖情况符合我们的要求, 则可通过系统的输出信号经处理后来判断<sup>[5]</sup>, 而无需要复杂的定位装置。

从技术难度和测试结果考虑, 我们以为斜缝法是比较理想的一种改进线扩展函数法。斜缝法测试数据的处理方法与前两种改进线扩展函数法相比, 稍显复杂, 通常有两种方法, 即差分法<sup>[5]</sup>和二维傅里叶变换法<sup>[3]</sup>。

(1) 差分法: 差分法的实质是把二维数据处理转换为 一维数据处理, 选择数据的每行数据代表狭缝的一个刀口扩展函数, 把它们进行水平差分即转换成线扩展函数, 然后把这  $N$  行数据交迭形成一维数据, 对此一维数据进行傅里叶变换, 即可求得系统的  $MTF$ 。

(2) 二维傅里叶变换法: 如果利用二维傅里叶变换来处理斜缝目标的测试数据, 算法上比较复杂, 但可以不考虑斜缝目标在探测器上的覆盖情况, 对所测数据进行直接处理即可。具体过程简介如下: 缝目标的相移在频率域也将产生一个斜面, 这些频率值中包含许多成份, 采用一定的数学方法可以把决定系统  $MTF$  的有效频率值挑选出来。

## 1.2 激光散斑法

当激光从粗糙表面反射或通过折射率无规则涨落的媒质传播时, 就形成无规则强度分布, 并称之为激光散斑。激光散斑实际上是一种空间噪声。

利用激光散斑进行  $MTF$  测试是新发展起来的一种方法, 其测试方框图如图 4 所示。激光散斑属于空间随机目标, 这种方法的数学基础是: 对一个具有一定功率能谱密度分布  $PSD_{in}(\xi, \eta)$  的随机目标, 系统输出功率谱密度  $PSD_{out}(\xi, \eta)$  与系统调制传递函数  $MTF$  的关系为:

$$PSD_{out}(\xi, \eta) = |MTF|^2 PSD_{in}(\xi, \eta) \quad (1)$$

如果我们知道输入目标的功率谱分布, 系统输出的功率谱通过系统的输出信号获得, 则我们很容易得到系统的  $MTF$ 。

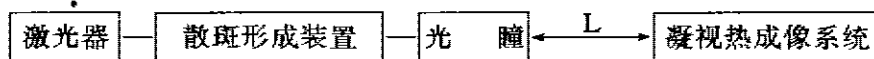


图 4 激光散斑法测试  $MTF$  原理方框图

Fig. 4 The framework of measurement of  $MTF$  using laser speckle

从原理上讲, 激光散斑是一种白噪声, 其自相关函数是狄拉克函数, 故其功率谱是一条直线, 也就是说, 图 4 中散斑形成装置出来的信号是空间白噪声。如果把该信号直接入射到成像面上, 由上讨论可知, 由于凝视系统的混淆特性, 将得不到系统的有效  $MTF$ 。由于输入信号是噪声目标, 故对这种方法, 不可能象上面一样采用某种技术来提高系统的采样频率, 因此只能采用某种技术使输入信号的空间频率小于该系统的奈奎斯特频率, 图 4 中, 光瞳的作用正是如此。

设光瞳的数学表达式为  $P(x, y)$ , 激光波长为  $\lambda$ , 光强为  $I$ , 则入射到成像器件表面激光散斑的功率能谱密度函数  $PSD_{in}(\xi, \eta)$  为<sup>[3]</sup>:

$$PSD_m(\xi, \eta) = \langle I \rangle \left\{ \delta(\xi, \eta) + \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} |P(x, y)|^2 |P(x - \lambda L \xi, y - \lambda L \eta)|^2 dx dy}{\left[ \iint_{-\infty}^{\infty} |P(x, y)|^2 dx dy \right]^2} \right\}, \quad (2)$$

由式(2)可知,通过对不同函数的光瞳设计及  $L$  的选择,可在成像面上得到所需的功率频谱密度分布的输入目标. 假如光瞳采用  $A \times A$  的方孔,则:

$$|P(x, y)|^2 = \text{rect} \frac{x}{A} \text{rect} \frac{y}{A}, \quad (3)$$

式(3)中,  $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1/2; \\ 0 & |x| > 1/2; \end{cases}$  将式(3)代入式(4),有:

$$PSD_m(\xi, \eta) = \langle I \rangle \left[ \delta(\xi, \eta) + \left( \frac{\lambda L}{A} \right)^2 \text{tri} \left( \frac{\lambda L}{A} \xi \right) \text{tri} \left( \frac{\lambda L}{A} \eta \right) \right], \quad (4)$$

其中,  $\text{tri}(x) = \begin{cases} 1 - |x| & |x| \leq 1; \\ 0 & |x| > 1; \end{cases}$  它是一个三角函数.

这种方法测试 MTF 的关键技术是:(1) 确保形成的激光散斑是理想的白噪声空间目标,现在已有比较实用的方法,如采用积分球技术<sup>[9]</sup>. (2) 精确保证入射到成像面上目标的功率谱分布,现在这也有成熟的理论作指导<sup>[10]</sup>.

在可见光波段,最简单的办法是让激光透射过一片表面比较粗糙的毛玻璃即可产生统计特性较好的激光散斑.但在红外波段,激光波长与透射材料的晶格间距相当,产生的散斑中将掺杂晶格特性的信息,影响其统计特性.故在红外波段和测试精度要求较高的可见光波段,采用积分球是一种较好的方法.积分球内壁涂有散射材料,在红外波段可采用金属材料.为防止入射到积分球内的激光光束直接从出孔输出,在积分球内部入口处加入一块遮光板,遮光板表面和内壁涂有相同的散射材料.激光进入积分球,经遮光板散射反射到内壁上,激光光束在球内经多次反射,到达出口时,相位相差  $2\pi$  的光束相互干涉,就形成均匀的激光散斑.这种办法产生的激光散斑,一级统计可达 95~99% 以上.用这种办法, Haner D. A. 和 Menzies R. T. 已成功做过  $10\mu\text{m}$  波段处的试验<sup>[11]</sup>.

当获得理想的激光散斑后,为保证入射到成像面上目标的最大空间频率小于系统的 Nyquist 频率,必须进行光瞳设计,最简单实用的光瞳即为上述的方孔光瞳.由上可知,经方孔光瞳后到达成像面的激光散斑在 Nyquist 空间频率处功率谱密度为零,因此,有时为了提高 Nyquist 频率附近的 MTF 测试精度或得到 Nyquist 频率外的 MTF 信息,必须采用特殊形状的光瞳,文献[10, 12]给出了进行这种设计的理论、方法及满足该要求的几种实用光瞳.

利用激光散斑方法测试凝视成像系统的 MTF 的突出优点是:它反映的是包括整个成像面的系统 MTF,它不需要复杂的红外光学系统.

## 2 结语

从上面的讨论可知,斜缝法与其它改进线扩展函数法相比,不需要精密的定位技术,算法上采用差分方法或二维傅里叶变换,实现比较容易.激光散斑法不需要复杂的红外光学系统,而且测得的是包括整个成像面的系统 MTF.因此,根据不同的条件,这是两种比较值得推广和研究的方法.

## REFERENCES

- 1 Williams T L, Davison N T. *SPIE*, 1992, **1689**: 53
- 2 Pruchnic S J, Mayott G P, Bell P A. *SPIE*, 1992, **1689**: 368
- 3 Tzannes A P, Mooney J M. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(6): 1808
- 4 Chambliss M A, Dawson J A, Borg E J. *SPIE*, 1995, **2470**: 312
- 5 Murphy K S J, Marshall A. *SPIE*, 1994, **2224**: 121
- 6 Boreman G, Derenlak E L. *Opt. Eng.*, 1986, **25**(1): 148
- 7 Sensiper M, Boreman G D. *SPIE*, 1992, **1683**: 144
- 8 Dainty J C, *Laser Speckle and Related Phenomena*, Berlin: Springer-Verlag, 1975
- 9 Boreman G, Sun Y, James A. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(4): 339
- 10 William A. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(6): 1684
- 11 Haner D A, Menzies R D. *Appl. Opt.*, 1993, **32**: 6804
- 12 Sensiper M, Borman G, Ducharme A D, et al. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(2): 395

MEASUREMENT OF THE *MTF* OF STARING  
THERMAL IMAGING SYSTEMS

FANG Hong-Bing YIN Bao-Quan PI De-Fu

(The Department of Optoelectronic Technology, College of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The main methods to measure the *MTF* of staring thermal imaging systems available now were described. The principles, technical features and key techniques of the canted slit method and laser speckle method were analyzed, respectively. The conclusion was gotten that these two methods deserve to study and popularize for the *MTF* measurement of the staring thermal imaging systems.

**Key words** modulation transfer function (*MTF*), staring thermal imaging systems, line spread function (*LSF*), canted slit method, laser speckle