

## 扫描辐射计 MTF 的测量

郑亲波 詹丽珊 胥学荣

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文介绍一种利用矩形光栅测量扫描辐射计 MTF 的方法。由于这种方法简便可行,且具有一定的精度,可以广泛应用于评价仪器的系统性能。

### 一、引言

一台优良的遥感仪器,应具有准确的工作波段,高的灵敏度以及理想的调制传递函数。这些表征仪器主要性能的参数,在仪器交付使用前应一一测量。

调制传递函数(MTF)能客观地反映仪器对不同空间频率的目标分辨能力。很多文章介绍过光学系统 OTF 或 MTF 的测试方法及测量装置<sup>[1][2][3]</sup>,但关于整机系统性能的评价却不多,并侧重于可见光范围的摄影、摄像系统。我们利用矩形光栅对在可见光和热红外波段工作的扫描辐射计进行了 MTF 的测量。这种方法简单易行而又准确,可以广泛用于评价整机系统性能。

### 二、测量原理

调制传递函数 MTF 是空间频率的函数,它定义为:

$$MTF = T(f) = M'(f)/M(f), \quad (1)$$

其中,  $M(f)$  是物方目标的对比度(或调制度),  $M'(f)$  是终端的信号对比度。

被测仪器是一台由光学系统、探测器、电子学系统所组成的扫描辐射计。目标辐射经过这三个环节转换成电信号后,传输给用户。扫描辐射计的传递函数  $MTF_s$  应由这三个独立环节的调制传递函数之乘积决定:

$$MTF_s = MTF_o \cdot MTF_D \cdot MTF_E, \quad (2)$$

其中<sup>[1,4]</sup>,

$$MTF_o = \text{sinc} \left( 0.867 \frac{\rho}{d} \frac{f}{f_0} \right), \quad (3)$$

$$MTF_D = \text{sinc} (f/f_0), \quad (4)$$

$$MTF_E = \left[ 1 + \left( 2 \frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

MTF<sub>o</sub> 为光学系统的调制传递函数, MTF<sub>D</sub> 为探测器的空间滤波传递函数, MTF<sub>E</sub> 为电子学滤波传递函数,  $d$  为光学系统象平面尺寸,  $\rho$  为弥散斑半径(假定弥散斑为圆形且亮度分布均匀),  $f_0$  为仪器的截止频率。

通常用正弦光栅(即亮度按正弦分布之光栅)作为目标来测量调制传递函数值。由于正

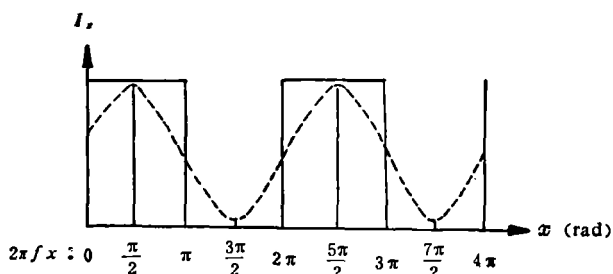


图1 矩形光栅亮度分布图

弦光栅制作困难,又不能保证精度,我们选用了简便易制的矩形光栅作为目标。在分别测出矩形波调制度  $M_{\text{矩}}(f)$  及  $M'_{\text{矩}}(f)$ , 求得  $T_{\text{矩}}(f)$  后, 对测量值进行变换<sup>[2]</sup>, 最后可求得正弦波定义的  $T(f)$  值。

矩形光栅的亮度分布(由图1实线表示)用傅里叶级数展开为:

$$I_s^{\text{矩}} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ \sin 2\pi(fx) + \frac{1}{3} \sin 2\pi(3fx) + \frac{1}{5} \sin 2\pi(5fx) + \dots \right] \quad (6)$$

设仪器调制传递函数为  $T(f)$ , 则矩形光栅经仪器终端输出的亮度分布(由图1虚线表示)为:

$$I_s'^{\text{矩}} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ T(f) \sin 2\pi(fx) + \frac{1}{3} T(3f) \sin 2\pi(3fx) + \frac{1}{5} T(5f) \sin 2\pi(5fx) + \dots \right] \quad (7)$$

从图1可以看出, 输出亮度的最大值在  $2\pi fx = \frac{\pi}{2}$  处, 最小值在  $2\pi fx = \frac{3}{2}\pi$  处。将它们代入式(7)得:

$$I_s'^{\text{矩}}_{\text{max}} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ T(f) - \frac{1}{3} T(3f) + \frac{1}{5} T(5f) - \frac{1}{7} T(7f) + \dots \right], \quad (8)$$

$$I_s'^{\text{矩}}_{\text{min}} = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \left[ T(f) - \frac{1}{3} T(3f) + \frac{1}{5} T(5f) - \frac{1}{7} T(7f) + \dots \right]. \quad (9)$$

根据调制度定义, 输出亮度的调制度  $M'_{\text{矩}}$  为:

$$M'_{\text{矩}} = \frac{I_s'^{\text{矩}}_{\text{max}} - I_s'^{\text{矩}}_{\text{min}}}{I_s'^{\text{矩}}_{\text{max}} + I_s'^{\text{矩}}_{\text{min}}} = \frac{4}{\pi} \left[ T(f) - \frac{1}{3} T(3f) + \frac{1}{5} T(5f) - \frac{1}{7} T(7f) + \dots \right], \quad (10)$$

而目标的调制度

$$M_{\text{矩}} = 1,$$

则

$$T_{\text{矩}}(f) = \frac{4}{\pi} \left[ T(f) - \frac{1}{3} T(3f) + \frac{1}{5} T(5f) - \frac{1}{7} T(7f) + \dots \right]. \quad (11)$$

对式(11)作必要的变换, 即可得到(正弦波)调制传递函数  $T(f)$ <sup>[2]</sup>:

$$T(f) = \frac{\pi}{4} \left[ T_{\text{矩}}(f) + \frac{1}{3} T_{\text{矩}}(3f) - \frac{1}{5} T_{\text{矩}}(5f) + \dots B_n \frac{1}{n} T_{\text{矩}}(nf) \right], \quad (12)$$

式中  $n$  为整奇数,

$$B_n = \begin{cases} (-1)^m (-1)^{(n-1)/2} & (\text{当 } r=m \text{ 时}), \\ 0 & (\text{当 } r < m \text{ 时}), \end{cases} \quad (13)$$

其中  $m$  是  $n$  分解为质因数的质数总数目,  $r$  是  $n$  分解为质因数后所含不同的质数的数目(如

$n=21=3\times 7$ , 则  $m=2, r=2$ ;  $n=45=5\times 3\times 3$ , 则  $m=3, r=2$ 。

表面上看来, 似乎式(12)中的项数很多, 但是, 每一台仪器都有一个截止频率  $f_0$ , 式(12)中凡是  $f > \frac{1}{3}f_0$  的各项值实际上都为零。因此, 测量时无须做很多矩形光栅。

### 三、实验装置

图2是测试扫描辐射计调制传递函数的实验装置示意图。虚线框内表示被测仪器的三个环节。

矩形光栅被辐射计的扫描镜扫描, 由光学系统成像于探测器上, 经电子学系统处理, 输出电信号。我们用示波器显示信号波形, 并用示波照相机记录下来。

为了便于利用式(12)进行数据处理, 矩形光栅的划分频率  $f$  应与  $f_0$  成比例。这样既正确又使分划板的数目最少。我们这次试验中, 取  $f = \frac{n}{6}f_0$  ( $n=1, 2, \dots, 6$ ), 一共采用六块分划板。图3是其中的一块分划板的图样。图中  $x$  方向即扫描的方向。

由于扫描辐射计工作时接收平行光, 因此, 我们将矩形光栅安置在反射式平行光管的焦平面上, 在分划

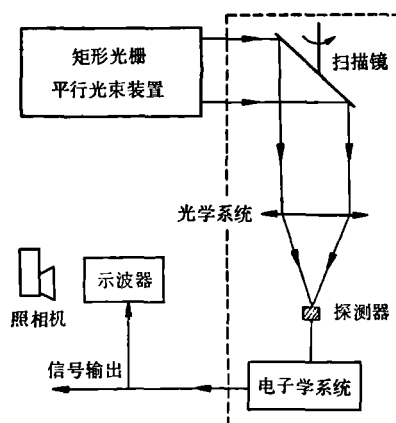


图2 测试装置示意图

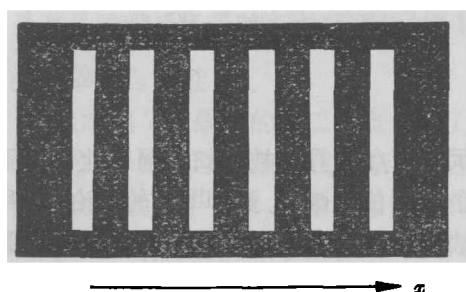


图3 矩形光栅分划板

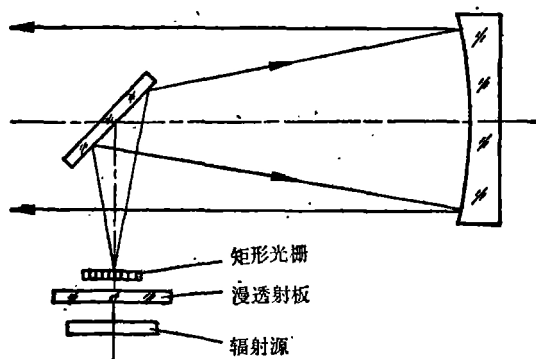
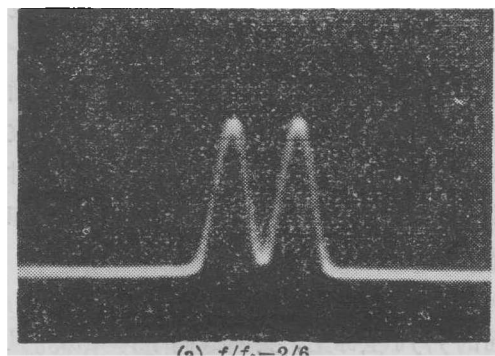
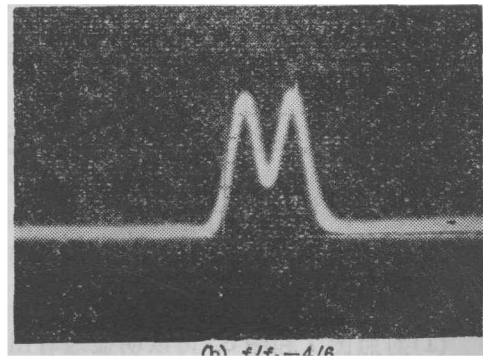


图4 矩形光栅平行光装置



(a)  $f/f_0=2/6$



(b)  $f/f_0=4/6$

图5 输出波形照片

板的后面放置温度均匀的热源作为红外通道的目标物, 放置亮度均匀的漫射板作为可见通道的目标物。这样就产生了矩形光栅平行光(图 4)。

更换分划板, 可以得到不同频率不同调制度的波形照片。图 5(a)、(b)表示在两个不同空间频率下摄得的波形照片。波形的数学表达式由公式(7)决定。

## 四、结果与分析

本试验中取得的扫描辐射计矩形波调制传递函数值示于图 6。图 7 是相应的(正弦波)调制传递函数曲线。

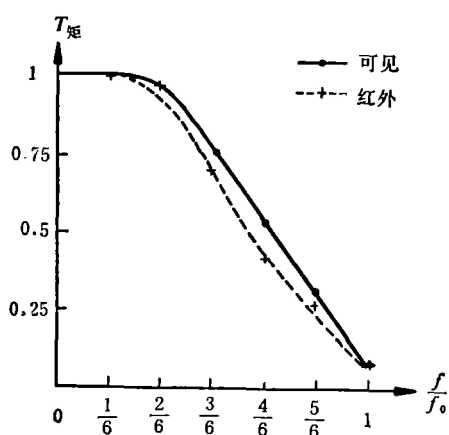


图 6  $T_{\text{矩}}-f/f_0$  实验曲线

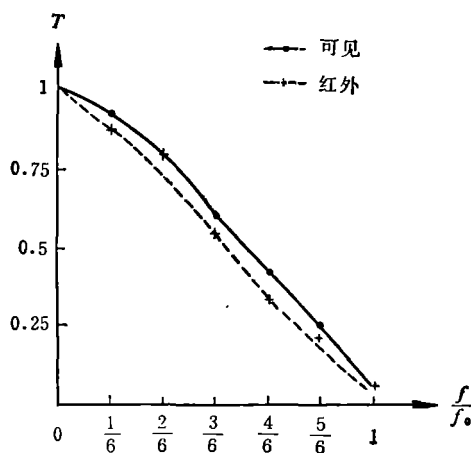


图 7 换算后得到的  $T-f/f_0$  曲线

下面对三个有关的问题作简要的分析。

### 1. 影响系统调制传递函数的主要因素

根据式(3)、(4)、(5), 并取  $d/\rho=3$ , 对应于不同的  $f/f_0$ , 算出被测扫描辐射计各个环节的调制传递函数, 及  $MTF_s$  的理论值, 列于表 1。

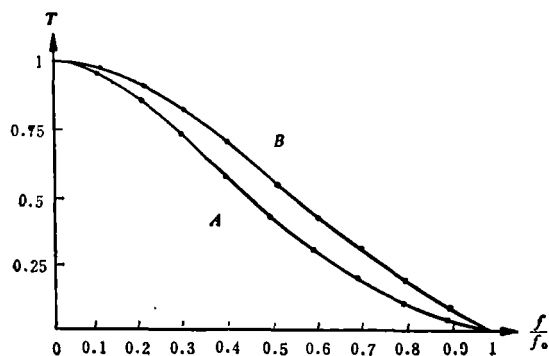


图 8  $T-f/f_0$  计算曲线

于表 1。 $MTF_s$  相对于  $f/f_0$  的曲线画在图 8。其中, B 组数据是电子学带宽为三倍于探测器截止频率时的数据。从表 1 和图 8 可以看出, 影响扫描辐射计调制传递函数的主要因素是  $MTF_D$  和  $MTF_E$ 。然而当一个系统参数确定之后,  $MTF_D$  基本上就确定了, 但  $MTF_E$  是可以变的, 只要探测灵敏度允许, 适当地把电子学带宽选宽一些, 对改善仪器的  $MTF_s$  是有利的。通观表 1 和

图 8 各点可知, 提高  $MTF_E$  的数值将使  $MTF_s$  明显得到改善。

### 2. 误差分析

(1)对照图 7 和图 8, 可以明显地看出, 在相同的  $f/f_0$  坐标上, 实测值高于计算值, 且  $T(f_0)$  不等于零。这是因为在测试时, 我们选用的  $f_0$  是设计值。由于扫描辐射计在制造时

表 1 辐射计  $MTF_s$  理论计算值

$f/f_0$	$MTF_0$	$MTF_D$	$MTF_E$		$MTF_s$	
			$A$	$B$	$A$	$B$
0	1	1	1	1	1	1
0.1	0.999	0.984	0.981	0.996	0.964	0.979
0.2	0.995	0.935	0.928	0.985	0.863	0.916
0.3	0.988	0.858	0.857	0.967	0.725	0.820
0.4	0.978	0.757	0.781	0.944	0.578	0.700
0.5	0.966	0.637	0.707	0.916	0.435	0.564
0.6	0.951	0.505	0.640	0.855	0.307	0.425
0.7	0.934	0.368	0.581	0.853	0.200	0.293
0.8	0.914	0.234	0.530	0.819	0.113	0.175
0.9	0.892	0.109	0.486	0.786	0.047	0.076
1.0	0.868	0	0.447	0.753	0	0

各个环节不可避免地引进误差,从而导致仪器的实际截止频率与设计值不一致(本例中实际值高于设计值)。假如将仪器实际的  $f_0$  值除实际的  $f$  值,从而得出  $f/f_0$ , 它所对应的  $MTF_s$  值就应接近计算值。实际上,测量所得曲线的横坐标一般不采用  $f/f_0$ , 而采用  $f$ (即频率),这样比较明了。人们把调制传递函数作为指标时,一般不去追求  $f_0$  的准确数值,所关心的是名义瞬时视场所对应的空间频率,即  $f/f_0 = \frac{1}{2}$  处的  $MTF_s$  值,以及  $f/f_0 < \frac{1}{2}$  的低频部分的  $MTF_s$  特性。

(2) 图 7 曲线上的第二个点(即  $f/f_0 = 2/6$  处)的  $T(f)$  值偏离曲线较远,这是由于测试  $T_{\text{照}}(f)$  时,采用示波照相机记录,然后判读照片而造成的误差。当示波器上波形线条较粗,而对比度接近于 1 时,读数不准,产生较大的误差。如果数据测量的终端设备不用示波照相机,改用同步采样和数字量读出方法,将会提高精度。

### 3. 提高测试精度的方法

(1) 增加测试点数目。我们选用的是六等分点,如果用十等分或更细一些的等分,则在计算时,式(9)就可以取更多的项,低频部分的数据就会更准确。

(2) 在每次测试时,都要保证扫描方向与栅条的方向垂直。对同一块分划板的数值应反复读数,以减少误差。

(3) 仔细选择辅助设备,如平行光管、示波器(或采样读数设备)等。要求电子设备的频带一定要高于被测仪器的频带。在我们的试验中,由于辐射计的空间截止频率不高(只有 278 周/弧度),辅助仪器的  $MTF$  并不影响试验结果。要求平行光管的发散角要小。尽管平行光管的  $MTF$  值可以测量,但是却无法从最后结果中扣除,因为平行光管的剩余象差,有时会使被测光学系统的  $MTF$  变坏,有时却对系统产生补偿作用而使系统的  $MTF$  变好,因而带有一定的随机性。

(4) 矩形光栅分划板的制造必须十分认真,栅条的宽度差,栅条的不平行度和不对称

性,都会对测量带来影响。选用长焦距的平行光管可以放宽对分划板的制造要求。

致谢——本工作得到翁垂骏、李佩珍、陈梅芳、杨武等同志大力协助和支持,特此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Lloyd, J. M. *Thermal Imaging Systems*, New York: Penum press, 1975.
- [2] 袁伟麟,光学传递函数及其数理基础,国防工业出版社,1979.
- [3] 蒋筑英,光学机械,(1977),1,23.
- [4] 叶人超,红外物理与技术,(1980),3,4.

## MEASUREMENT OF MTF OF SCANNING RADIOMETER

ZHENG QINBO, ZHEN LISHAN, XU XUERONG

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

In this paper a method for measuring the MTF of a scanning radiometer with a rectangular grating is described. This method can be used for evaluating the performances of equipment systems because of its simplicity and enough accuracy.