

红外传递函数仪的零频规范化研究

冯卓祥 刘中本

(西安应用光学研究所)

摘要——在调制传递函数(MTF)测量中,零频规范化的精度直接影响传递函数的测量精度。本文讨论了用矩形光栅和轮辐状的斩光器进行零频规范化的两种计算方法,并对两者进行了比较。

一、前 言

我们研制了一台红外传递函数仪,它是测量工作于 $2\sim 14\mu\text{m}$ 波段的红外成像镜头象质的精密测试仪(见图1);其光学系统如图2所示。

本仪器用矩形光栅对被测镜头所成的狭缝象进行扫描,用热释电LATGS器件接收扫描后的信号,经过选频放大电路,获得信号值 $M(f)$ 。把此值与零频规范化时获得的信号值 $M(0)$ 相除,就可得到成像镜头的MTF为

$$MTF = \frac{M(f)}{M(0)} \quad (1)$$

对式(1)中 $M(0)$ 进行微分,可以

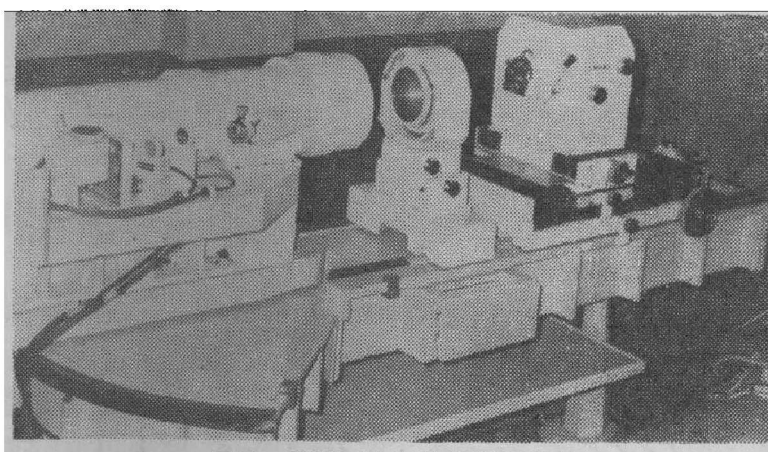


图1 HW-84 红外传递函数仪

Fig. 1 The instrument for measuring MTF in infrared range

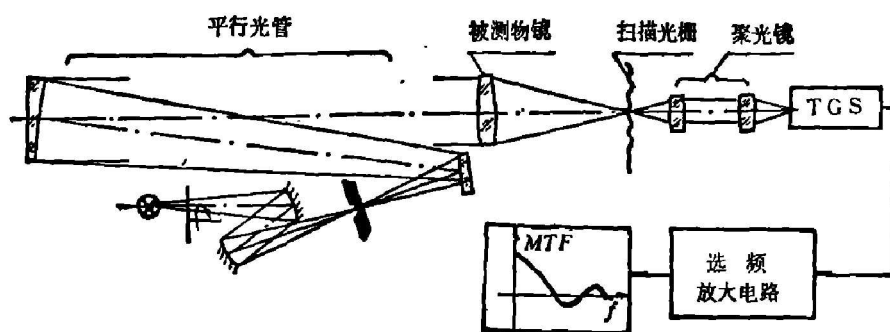


图2 红外传递函数仪光学系统图

Fig. 2 The optical system of the instrument for measuring MTF in infrared range

本文1984年8月13日收到。

得到

$$\Delta MTF = \frac{M(f)}{M(0)} \cdot \frac{\Delta M(0)}{M(0)} \quad (2)$$

从式(2)可以看到, $M(0)$ 的测量精度直接影响到 MTF 的精度。

二、用矩形光栅作零频规范化的分析

零频规范化就是用空间频率为零的矩形光栅对狭缝象扫描, 将所得到的信号值规范化为 1^[4]。空间频率为零的矩形光栅意味着光栅格宽为无穷大, 这显然是做不到的。本文寻求用一定宽度的光栅格进行扫描, 来近似地达到零频规范化。

设光栅为简单均匀分格, 其透明和不透明部分的宽度均为 l_0 , 则周期为 $2l_0$ 。又设狭缝亮度均匀分布, 宽度为 D , 总光能量为 A 。矩形光栅对狭缝象的扫描过程就是光栅的透过函数与狭缝亮度分布空间函数的卷积, 如图 3 所示。

若以光栅透光部份的中心为坐标原点, 这个卷积后的函数(见图 3b)为

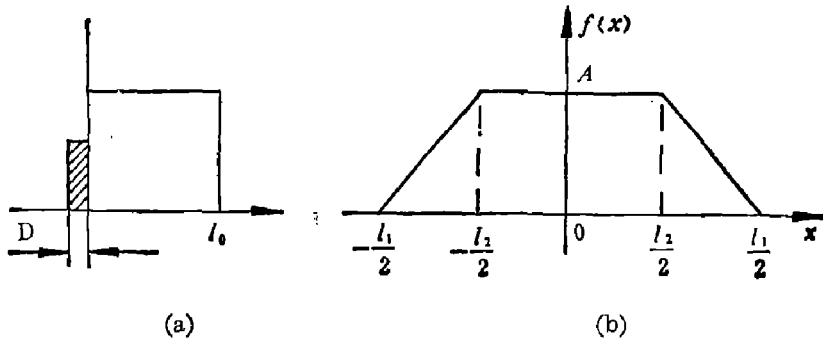


图 3 图解法卷积运算

(a) 卷积 (b) 结果

Fig. 3 Graphical method for the convolution operation

(a) the convolution operation (b) the result

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2A}{l_1 - l_2} \left(\frac{l_1}{2} + x \right) & \left(-\frac{l_1}{2} < x < -\frac{l_2}{2} \right); \\ A & \left(-\frac{l_2}{2} \leq x \leq \frac{l_2}{2} \right); \\ \frac{2A}{l_1 - l_2} \left(\frac{l_1}{2} - x \right) & \left(\frac{l_2}{2} < x < \frac{l_1}{2} \right); \\ 0 & \left(\frac{l_2}{2} \leq x, x \leq -\frac{l_1}{2} \right). \end{cases}$$

求 $f(x)$ 的傅氏级数, 由于 $f(x)$ 是偶函数, 则

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx),$$

去除直流项, 可得

$$f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nx).$$

$$F(\omega) = a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(x) \cos(\omega x) dx = \frac{16A}{T(l_1 - l_2)\omega^2} \sin\left(\frac{l_1 + l_2}{4} \omega\right) \sin\left(\frac{l_1 - l_2}{4} \omega\right),$$

式中, $T = 2l_0$; $l_1 - l_2 = 2D$; $l_1 + l_2 = 2l_0$ 。

则
$$a_n = \frac{4A}{l_0 D \omega^2} \sin\left(\frac{l_0}{2} \omega\right) \sin\left(\frac{D}{2} \omega\right)。$$

用选频放大电路滤出基频 ω_0 的模,

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \pi/l_0;$$

$$a_n = \frac{4l_0 A}{\pi^2 D} \sin \frac{D}{2} \frac{\pi}{l_0} = \frac{2A}{\pi} \frac{\sin B}{B}; \quad (3)$$

$$B = \frac{D}{2} \frac{\pi}{l_0}。 \quad (4)$$

可见当狭缝宽度确定后, 输出的基频信号振幅值随光栅栅格的变化按 $\sin c$ 函数分布。显然

$$F(\omega_0=0) = \frac{2A}{\pi} = 0.637A。 \quad (5)$$

若要求 $\Delta M(\omega_0=0)/M(\omega_0=0) \leq 1\%$,

则
$$\frac{\sin B}{B} \geq 99\%。$$

当 $D = 0.2$ 时, $l_0 \geq 1.29$ 。

对应的空间频率为 0.77 l/mm , 也就是用空间频率为 0.77 l/mm 的光栅板对狭缝象扫描, 将得到的值作为零频归化值, 由此所产生的 ΔMTF 值不大于 1% 。

北京华北光学仪器厂研制的 GOY-1 型光学传递函数仪, 就是用空间频率为 0.041 l/mm 的矩形光栅进行扫描, 并用得到的值作为零频归化值^[9]。

三、用轮辐状斩光器作零频规化的分析

传递函数仪多在物方照明光路中用轮辐轴状斩光器进行调制, 以斩光器的调制传递函数值作用零频规化值。

一般传递函数仪是一个矩形辐射目标被轮辐状斩光器(见图 4)调制。求调制后基频所占分量的比例, 即斩光器调制传递函数值的大小。

我们假设: (1) 辐射均匀; (2) 辐射为直线传播, 不考虑衍射效应; (3) 斩光器的齿与孔宽度相等; (4) 图象比斩光器齿孔小。

假设矩形图象大小为 $2a \times ma$, 它的底边距离斩光器中心为 ρ , 如图 4 所示。在图象上取一个条形微面积 ds ,

$$\begin{aligned} ds &= \frac{(OB - OA)(OB + OA)}{2} d\theta \\ &= \frac{1}{2} (2OA + AB) AB d\theta, \end{aligned}$$

在 $\theta_1 \sim \theta_2, \theta_3 \sim \theta_4$ 区间内,

$$AB = [a - \rho \tan(\theta - \theta_0)] / \sin(\theta - \theta_0);$$

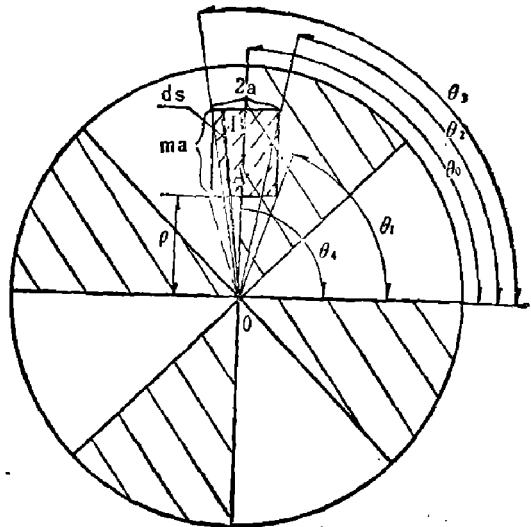


图 4 一个矩形目标被轮辐状调制盘调制
Fig. 4 A rectangular target modulated by a wagon wheel chopper

在 $\theta_2 \sim \theta_3$ 区间内,

$$AB = ma / \cos(\theta - \theta_0),$$

$$OA = \rho / \cos(\theta - \theta_0).$$

令 $\theta' = \theta - \theta_0$, 并考虑到 θ' 很小, 以致 $\cos \theta' \doteq 1$; $\sin \theta' \doteq \theta'$ 。

因此得到 ds 表达式为

$$ds = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{\theta'^2} - \rho^2 \right) d\theta' & (\text{在 } \theta_1 \sim \theta_2, \theta_3 \sim \theta_4 \text{ 区间内}); \\ \frac{1}{2} (m^2 a^2 + 2ma\rho) d\theta' & (\text{在 } \theta_2 \sim \theta_3 \text{ 区间内}). \end{cases} \quad (6)$$

令 $Z = a/\rho$, 则

$$\left. \begin{aligned} \theta'_1 &= -Z; \\ \theta'_2 &= -Z/(1+mZ); \\ \theta'_3 &= Z/(1+mZ); \\ \theta'_4 &= Z. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对 ds 这一微小面积而言, 透过调制盘的辐射能 $dF(t)$ 为

$$dF(t) = E\tau(\theta' + \Omega t) ds; \quad (8)$$

式中 E 为单位面积的平均辐射量, $\tau(\theta' + \Omega t)$ 为斩光器对条形微面积的透过特性的函数。

整个目标象透过调制盘的辐射能 $F(t)$ 是各个微面积在同一瞬时透过的辐射能之和^[2],

$$F(t) = E \int_s \tau[\theta' + \Omega t] ds. \quad (9)$$

根据文献[2]的推导,

$$\tau[\theta' + \Omega t] = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n [\sin n\theta' \cos(n\theta_0 + n\Omega t) + \cos n\theta' \sin(n\theta_0 + n\Omega t)]; \quad (10)$$

于是

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t);$$

$$F_1(t) = \frac{1}{2} E \int_s ds = \frac{1}{2} A;$$

$$F_2(t) = E \int_s \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\theta' \cos(n\theta_0 + n\Omega t) ds.$$

由式(6)、式(7)可知, 在 $\theta'_1 \sim \theta'_2$ 和 $\theta'_3 \sim \theta'_4$ 区间内 ds 为 θ' 的偶函数; 在 $\theta'_2 \sim \theta'_3$ 区间内 ds 为 θ' 的零次函数, 整个被积函数为 θ' 的奇函数。所以

$$F_2(t) = 0,$$

$$F_3(t) = 2E \left[\int_{\theta'_1}^{\theta'_2} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\theta_0 + n\Omega t) \cos n\theta' \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{\theta'^2} - \rho^2 \right) d\theta' \right. \\ \left. + \int_0^{\theta'_3} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\theta_0 + n\Omega t) \cdot \cos n\theta' \cdot \frac{1}{2} ma(ma + 2\rho) d\theta' \right]. \quad (11)$$

由上可见, 辐射的能量有一半未被调制, 真正被调制有用的是 $F_3(t)$ 。

根据方波的频谱分析, 可得到斩光器透过特性函数基频项的系数 B_{ω_0} 。

$$B_{\omega_0} = \frac{2}{\pi}.$$

在光电傅氏分析中, 按时间进行频谱分析的结果可直接运用于对空间进行频谱分析, 于是可得到空间频率为零的调制传递函数值 $F_3(\omega_0)$ 为

$$F_s(\omega_0) = \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n\theta_0 + n\Omega t) \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{\theta'^2} - \rho^2 \right) \cos n\theta' d\theta' \right. \\ \left. + \int_0^{\theta_1} \frac{1}{2} ma(ma + 2\rho) \cos n\theta' d\theta' \right]; \quad (12)$$

式中 n 为调制盘的条辐数。

在可见光传递函数仪的照明光路中, 斩光器一般是被放在灯丝的一个中间象面处。但在红外传递函数仪的照明光路中, 很难把斩光器放在光源的某一象面处来调制, 于是就顺着光路找一个合适的离焦位置来安放斩光器。因而在红外传递函数仪中, 讨论零频归化更有必要。

随着斩光器在光轴方向位置的变动, 被调制的图象大小也随之有所变化。

在图 5 中, 若 O 点为物面, 物的大小为 $h_0 \times b_0$ 。当斩光器放在离开 O 点距离为 x 的 C 这个位置, 它所调制的图象大小就是 $h_1 \times b_1$ 。

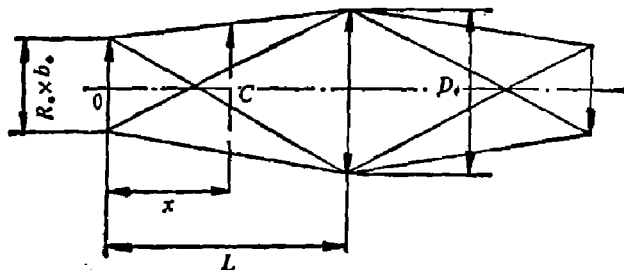


图 5 光学系统中图象大小的变化
Fig. 5 The size variation of the images in the optical system

$$h_1 = 2 \cdot \left(\frac{\frac{D_s}{2} - \frac{h_0}{2}}{L} \times x \right) + h_0 = \left(\frac{D_s - h_0}{L} x \right) + h_0; \quad (13)$$

$$b_1 = \left(\frac{D_s - b_0}{L} x \right) + b_0. \quad (14)$$

当然, 此时的图象轮廓已不清晰, 照度也不均匀了。但若 x 不太大时, 可认为图象面照度分布是均匀的。

四、零频归化用斩光器的设计

根据以上分析, 我们设计了零频归化所用的斩光器。例如在两个球面反射镜组成的红外照明光路中放置一个作零频规化的斩光器, 其光路如图 2 所示。根据仪器总体结构设计的要求:

光源大小为 $h_0 \times b_0 = 15 \times 2 \text{ mm}^2$,

反射镜直径 $D_s = 45 \text{ mm}$,

反射镜焦距 $L = 300 \text{ mm}$,

图象底边距斩光器中心 $\rho_0 = 42.5 \text{ mm}$ (在 $x=0$ 的位置)

若斩光器中心 x 分别为 0、50、75 时, $F_s(\omega_0)$ 调制传递函数值计算结果如表 1 所示。

把计算的数值与标准零频归化值 $\frac{2}{\pi} A$ 相比较, 若为了保证零频归化精度不小于 0.01,

就可以确定以下两点,

(1) 当仪器总体结构设计要求 $x=50$ 时, 斩光器的轮辐数不宜超过 3。

(2) 当仪器总体结构设计要求 $x=75$ 时, 斩光器的轮辐数不宜超过 2。

法国研制的工作于 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 波段的 ACOFAM 红外传递函数仪, 其斩光器也工作于图 2 所示照明光路中, 它的轮辐数取为 $2^{[4]}$ 。我们研制的红外传递函数仪斩光器的轮辐数取为 1。

表1 $F_3(\omega_0)$ 计算结果
Table 1 The calculated results of $F_3(\omega_0)$

x	n 斩光器的轮辐数																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
50	0.64	0.63	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.56	0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.38	0.37
75	0.64	0.63	0.62	0.61	0.59	0.58	0.55	0.53	0.51	0.48	0.45	0.42	0.38	0.35	0.31	0.28	0.24	0.21	0.18

五、结 论

1. 用矩形光栅扫描测量传递函数值时, 其零频规化的标称值是 $\frac{2}{\pi} A$ 。

2. 在设计传递函数仪的零频规化器时, 要考虑斩光器的半径, 轮辐数 n , 图象大小 $b \times h$, 图象相对斩光器中心的距离, 以及斩光器在光路中的位置 w 等诸因素的影响。为了保证零频规化精度达 0.01, 可以根据公式 (7)、(12)、(13)、(14) 进行计算, 并考虑到仪器总体结构设计的要求, 注意选择好以上各参数。

3. 在一般的光电装置中, 也常用此类斩光器来调制方形灯丝象, 以获得交变信号, 免去外界杂光的干扰。本文所提供的公式同样适用于求它的调制传递函数值。

致谢——在此文撰写过程中, 得到我组同志们的支持和帮助, 在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Jack. D. Gaskill, *Linear Systems, Fourier Transforms and Optics*. New York: John Wiley & Sons, 1978, 150.
- [2] 杨宜禾, 岳敏编, 红外技术, 西北电讯工程学院, 1981, 2~1.
- [3] 王棣颖, CCY-1 型光学传递函数测定仪测量系统分析, 华北光学仪器厂设计所, 1980.
- [4] Pouleau J., *Proc. SPIE*, Vol 46, 1974, 299.

STUDY OF NORMALIZATION OF THE INSTRUMENT FOR MEASURING MTF IN INFRARED RANGE AT ZERO SPATIAL FREQUENCY

FENG ZHUOXIANG, LIU ZHONGBEN
(Xi'an Institute of Applied Optics)

ABSTRACT

The computing methods of normalization of the instrument for measuring MTF in infrared range at zero spatial frequency with the rectangular grating or wagon wheel chopper are discussed. They are compared with each other.