

# 基于傅里叶功率谱的感光材料 分辨率的客观测定

刘铁根 张以谟 李豫华

(天津大学现代光学仪器研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

朱敬斯

(天津远大感光材料公司质检中心, 天津 300072)

**摘 要** 提出傅里叶功率谱法评价分辨率标板极限分辨率值的理论判据。这是一种用光学信息处理原理对标板图案傅里叶谱进行分析处理的客观评价方法。文中建立了与分辨率标板图案相适应的傅里叶谱数学模型, 并通过对傅里叶谱的理论计算和分析找出了标板图案分辨率值与功率谱图各次极大之间的关系。

**关键词** 感光测定, 感光材料分辨率, 傅里叶功率谱。

## 1 引 言

我国现行的感光材料分辨率主观评价方法是在显微镜下用人眼观测样片的分辨率标板图案, 评价过程是用感光材料分辨率测定仪在一张样片上拍摄出 35 幅分辨率图案。将这种样片放在 100 倍的显微镜下, 由有经验的操作人员靠人眼观测去判断样片上分辨率标板图案的最小线对组数, 再查表找出对应的分辨率值作为该样片极限分辨率。国家标准<sup>[1]</sup>在现有状态下, 也是推荐这种方法作为样片极限分辨率标准判读方法。不过, 用这种主观评价方法, 即使是受过培训的操作人员来判读, 也会带来主观误差。因此, 需要寻求一种能客观判别样片极限分辨率值的方法, 才能建立感光材料分辨率测定的统一、科学的评判标准。

## 2 感光材料分辨率测定的客观评价方法讨论

### 2.1 分辨率标板图形特征

图 1 所示为标有坐标的分辨率标板, 其基本特征为:

- 1) 每一组检测图案为外接正方形范围内长  $2a_i$  的等宽三线条;
- 2) 各组三线条按空间频率递增顺序排列, 以便易于辨认各个检测图案;
- 3) 各相邻图案空间频率相差  $\sqrt[20]{10}$ , 即

$$\frac{\text{后组图案空间频率}}{\text{前组图案空间频率}} = \sqrt[20]{10};$$

4) 检测图案空间频率愈高，愈是靠近阵列中心。

由图可知，分辨率标板图形中各组线条是按正方螺旋式排列的，并且所有线条排列方向都是平行的，这为图像特征的提取和处理提供了便利条件。

### 2.2 几种客观方法比较

下面对几种方法在难易程度、技术水平和存在问题等方面进行比较，以得到较为合适的方法。

#### 1) 光学扫描式<sup>[2]</sup>分辨率标板成像

光学扫描式是利用光束的扫描运动来逐行扫描图形。由于分辨率图形不是排列在一条直线上，这样对其进行光学扫描比较困难，它要进行全视场线性扫描，需要一定长度光敏接收器件和同时识别扫描到空间不同位置的三线图形分辨率值的差异。

#### 2) 机械扫描式<sup>[3]</sup>分辨率标板成像

若能完成沿图形正方螺旋排列方向的机械扫描，则光学提取图形将十分简单，但由于待测视场尺寸从 40 μm 到 1 μm(以 1000 线对/毫米计的各个图形尺寸)较大范围内发生变化，涉及微机械扫描，实现的难度较大。

#### 3) 图像法<sup>[4]</sup>

这种方法是将整个标板像摄入光电探测器如 CCD 摄像机中，然后借助计算机图像分析进行图像分辨率的识别和测定。采用计算机数字图像处理方式，即离散函数的计算机傅里叶变换形式来分析标板的分辨率图形。存在问题是它受限于摄像机的光敏面结构。CCD 光敏单元为 7 μm，考虑到光敏面最小可分辨距离为两个光敏单元的距离，又加上近摄距的限制，将标板上 100 线对/毫米以上分辨率图形摄入摄像机中是很困难的。

#### 4) 光学信息处理法<sup>[5]</sup>

此法是将标板上分辨率图形放入傅里叶变换系统前焦面位置，在其后焦面得到其频谱。分析各频谱分量，可导出空域的最高频率分量，即可求出胶片上图形的最大分辨率值。为借助计算机对图形的频谱进行分析处理，需要将傅里叶变换系统后焦面的频谱摄入 CCD 摄像机系统，然后由计算机处理。由傅里叶变换的理论可知，标板上图形的频率越高，其在谱面的频谱分量离中心距离越大。因此，这有利于标板上较高频率的分辨率图形的处理。

## 3 分辨率标板的光学傅里叶变换及其频谱与功率谱

### 3.1 分辨率标板的光学傅里叶变换

由光学信息处理理论可知，会聚透镜能对输入图像进行二维傅里叶变换。傅里叶变换的光路如图 2 所示。设一个平面物体 O 放在透镜 L 之前距离为  $f$  处，受一个单色平面波垂直、

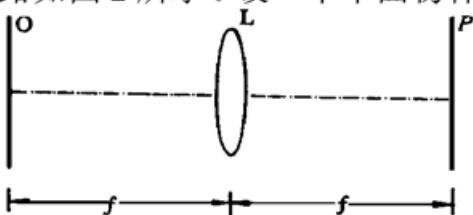


Fig. 2 Setup of a Fourier transform optical system

均匀照明。若透明物体的透过率分布函数为  $f(x, y)$ ，在透镜后焦面 P 上所得的频谱分布为

$$F(u, v) = \iint_{\infty} f(x, y) \exp[-i(ux + vy)] dx dy.$$

(1)

这就是  $f(x, y)$  的二维傅里叶变换。这里忽略了与透镜变换相联系的常数相位因子，这是因为有实际意义的是

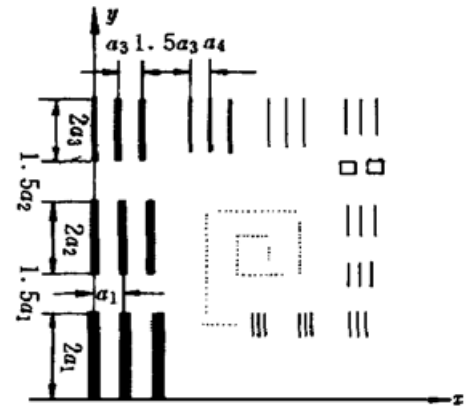


Fig. 1 The resolving power test chart coordinate

焦面上的强度分布, 即是物体的傅里叶变换功率谱。

### 3.2 分辨率标板的函数表达形式

分辨率标板中任一组检测图案示于图 3(a)。通光部分分成三个长方形孔, 每个孔的面积为  $2a_i^2$ 。由均匀照明的条件, 可得任一组线发光常数为  $K_i = 1 \times 2a_i^2$ , 组数  $i = 1, 2, 3 \dots$ 。假设长方形孔无限窄, 即图 3(b) 情况, 则标板上各组线发光常数可分别为

$$\text{第 1 组图案} \quad K_1 = 2a_1^2,$$

$$\text{第 2 组图案} \quad K_2 = 2a_2^2,$$

... ..

可设比例系数  $\beta = 1/\sqrt[20]{10}$ 。由图 1 可得

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= a_1(\sqrt[20]{10})^{-1} = \beta a_1, \\ a_3 &= a_2(\sqrt[20]{10})^{-1} = \beta a_2 = \beta^2 a_1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可推出各组线发光常数分别为

$$\text{第 1 组图案} \quad K_1 = 2a_1^2,$$

$$\text{第 2 组图案} \quad K_2 = 2a_2^2 = 2\beta^2 a_1^2, \quad \dots \dots$$

$$\text{第 } n \text{ 组图案} \quad K_n = 2a_n^2 = 2\beta^{2(n-1)} a_1^2 \quad (n = 1, 2, \dots, N),$$

则

$$K_2 = \beta^2 K_1, \quad K_3 = \beta^4 K_1, \quad \dots \dots, \quad K_n = \beta^{2(n-1)} K_1.$$

### 3.3 分辨率标板的傅里叶变换频谱分布

在均匀照明条件下, 任一组图案的分布函数表示为

$$f_i(x, y) = K_i[\delta(x_0) + \delta(x - a_i) + \delta(x - 2a_i)]. \quad (3)$$

可列出在透镜后焦面各组图案的频谱分布, 第  $n$  组图案的频谱分布为

$$F_n(u, v) = \iint_{\mathcal{A}} f_n(x, y) \exp[-i(ux + vy)] dx dy \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (4)$$

## 4 分辨率标板图案的傅里叶功率谱的表示

### 4.1 分辨率标板的傅里叶变换功率谱理论计算

分辨率标板各线条是沿  $y$  轴排列的, 由光学原理可知, 可以简化处理。在一定条件下, 略去物空间  $y$  轴频谱空间  $v$  方向频谱分布, 只须分析  $x$  轴即  $u$  方向的傅里叶变换规律。

令分辨率标板图案第一组线发光常数  $K_1 = 2a_1^2 = 1$  作为单位面积发光常数。可解出  $a_1 = 1/\sqrt{2}$ 。由(4)式可展开解出:

第 1 组图案的频谱分布为

$$\begin{aligned} F_1(u) &= \int f_1(x, y) \exp(-iux) dx = \\ &K_1 \int [\delta(0) + \delta(x - a_1) + \delta(x - 2a_1)] \exp(-iux) dx = c_1 - id_1, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $c_1 = 1 + \cos(0.7u) + \cos(1.4u)$ ,  $d_1 = \sin(0.7u) + \sin(1.4u)$ 。

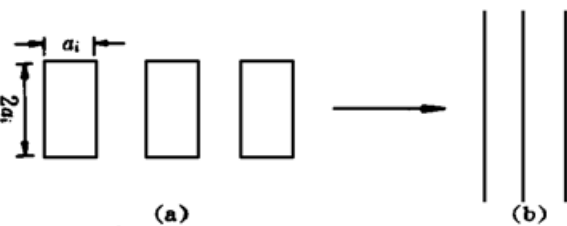


Fig. 3 A set of test pattern

第 2 组图案的频谱分布为

$$F_2(u) = \int f_2(x, y) \exp(-iux) dx = K_2 \int [\delta(0) + \delta(x - a_2) + \delta(x - 2a_2)] \exp(-iux) dx = c_2 - id_2, \quad (6)$$

其中,

$$c_2 = 0.8 + 0.8 \cos(0.6u) + 0.8 \cos(1.2u),$$

$$d_2 = 0.8 \sin(0.6u) + 0.8 \sin(1.2u).$$

这里,  $\beta = (\sqrt[20]{10})^{-1}$ ,  $a_2 = \beta a_1 = 0.6$ ,  $K_2 = \beta^2 K_1 = 0.8$ .

第  $n$  组图案的频谱分布为

$$F_n(u) = \int f_n(x, y) \exp(-iux) dx = c_n - id_n \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

这里, 主要关注的是其在频谱面的功率谱的分布。为简化书写, 可假设  $F_i(u) \rightarrow F_i$ , 则前四组图案功率谱可分别写成

$$P_4 = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4)(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)^* = F_1 F_1^* + F_1 F_2^* + F_1 F_3^* + F_1 F_4^* + F_2 F_1^* + F_2 F_2^* + F_2 F_3^* + F_2 F_4^* + F_3 F_1^* + F_3 F_2^* + F_3 F_3^* + F_3 F_4^* + F_4 F_1^* + F_4 F_2^* + F_4 F_3^* + F_4 F_4^*. \quad (8)$$

$$\text{由 } P_{11} = F_1 F_1^* = (c_1 - id_1)(c_1 - id_1)^* = c_1^2 + d_1^2, \quad (9)$$

$$P_{12} = F_1 F_2^* + F_2 F_1^* = (c_1 - id_1)(c_2 + id_2) + (c_2 - id_2)(c_1 + id_1) = 2c_1 c_2 + 2d_1 d_2. \quad (10)$$

同理可得

$$\left. \begin{aligned} P_{22} &= F_2 F_2^* = c_2^2 + d_2^2, \\ P_{33} &= F_3 F_3^* = c_3^2 + d_3^2, \\ P_{44} &= F_4 F_4^* = c_4^2 + d_4^2, \\ P_{13} &= F_1 F_3^* + F_3 F_1^* = 2c_1 c_3 + 2d_1 d_3, \\ P_{14} &= F_1 F_4^* + F_4 F_1^* = 2c_1 c_4 + 2d_1 d_4, \\ P_{23} &= F_2 F_3^* + F_3 F_2^* = 2c_2 c_3 + 2d_2 d_3, \\ P_{24} &= F_2 F_4^* + F_4 F_2^* = 2c_2 c_4 + 2d_2 d_4, \\ P_{34} &= F_3 F_4^* + F_4 F_3^* = 2c_3 c_4 + 2d_3 d_4, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将(5)代入(9)(11)式, 经计算再代入(8)式, 得前 4 组图案的功率谱分布为

$$P_4 = P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{22} + P_{23} + P_{24} + P_{33} + P_{34} + P_{44} = 10.80 + 1.02 \cos(0.04u) + 1.02 \cos(0.08u) + 1.60 \cos(0.10u) + 1.28 \cos(0.14u) + 1.60 \cos(0.20u) + 1.28 \cos(0.28u) + 1.28 \cos(0.42u) + 2.60 \cos(0.50u) + 1.02 \cos(0.52u) + 4.94 \cos(0.56u) + 5.18 \cos(0.60u) + 1.02 \cos(0.64u) + 6.88 \cos(0.70u) + 0.80 \cos(0.76u) + 1.60 \cos(0.80u) + 1.92 \cos(0.84u) + 0.50 \cos(1.00u) + 1.00 \cos(1.06u) + 3.12 \cos(1.12u) + 3.90 \cos(1.20u) + 1.80 \cos(1.26u) + 0.64 \cos(1.34u) + 0.80 \cos(1.36u) + 5.52 \cos(1.40u) + 1.00 \cos(1.56u) + 1.80 \cos(1.76u) + 0.64 \cos(1.84u) + 0.80 \cos(1.86u) + 0.64 \cos(1.90u) + 2.44 \cos(1.96u) + 1.0 \cos(2.26u) + 0.80 \cos(2.36u) + 0.64 \cos(2.40u) + 2.44 \cos(2.46u) + 2.44 \cos(2.96u), \quad (12)$$

从(12)式不难看出,  $F_i$  与  $c$ 、 $d$  之间有如下规律:

$$P_{ij} = F_i F_j^* + F_j F_i^* = 2c_i c_j + 2d_i d_j, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

为作分析比较, 需进一步计算出前 6 组  $P_6$  和前 8 组  $P_8$  分辨率图案的功率谱分布。由于此类计算冗长, 而且为了使分析比较能更加清晰, 还需作出分布式的图形解。

#### 4.2 几组分辨率标板图案的傅里叶功率谱的分析

分辨率标板图案的各组功率谱频特性如峰值大小、侧峰偏移等仅靠公式是无法分析出结果的, 若将各组功率谱表达式依靠数学作图功能绘成图形, 就可清晰观察, 进而分析出各图形与分辨率值之间的关系。

由图 4 中  $P_4$ 、 $P_6$  和  $P_8$  各曲线比较, 可看出随着三线组图案序号的增大(也即分辨率值加大), 功率谱图的各次极大曲线向  $u$  值大的方向移动。

由此可以得出如下推论: 随着标板图案分辨率值的加大, 其对应功率谱图的各次极大的位置  $u$  也随之增加; 由频谱中最大或次极大值对应的  $u$  值, 可推算出该图案分辨率的大小。

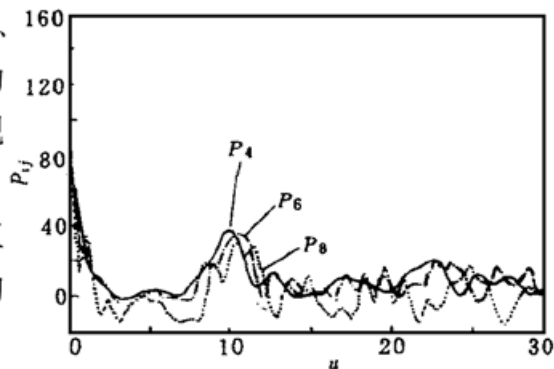


Fig. 4 The resolving power test chart power spectrum figure

## 5 感光材料分辨率测定傅里叶变换实验系统及实验结果

### 5.1 实验系统

通过标板图案的傅里叶谱的数字分析, 可推导得出标板图案的傅里叶谱的分布与标板图案的分辨率值有对应规律。本节试图用实验的方法来验证数学分析的结论。

实验系统中有  $20 \mu\text{m}$  的针孔空间滤波器和  $10\times$  的扩束镜, 傅里叶变换透镜使用 FTL1000 傅里叶变换物镜, 其焦距  $f = 1000 \text{ mm}$ , 为远距式, 筒长比为 0.85, 波像差为  $M8$ 。激光束经空间滤波系统得到照度均匀的平行光。分辨率标板放置在傅里叶变换透镜的前焦面上, 一毛玻璃观察屏置于傅里叶变换透镜的后焦面作为输出面以便观测傅里叶功率谱。CCD 摄像机将输出面的功率谱图像摄入后, 由计算机进行图像采集和处理。

### 5.2 实验结果

实验装置如图 5 所示。标板处配置各种矩形光栏, 以便允许某一等级的分辨率标板图案通过。

正负标板图形分别示于图 6、图 7, 图 8 为在频谱面拍摄的正标板功率谱图照片。图 9 为正标板功率谱经 CCD 摄像机摄入后经计算机制成的 DMP(位图文件扩展名) 文件打印出的正像与反像图片。与之相对比, 图 10 给出负标板功率谱图片和它的反像。图 11 是负标板前 2-2 组的功率谱图片和它的反像。

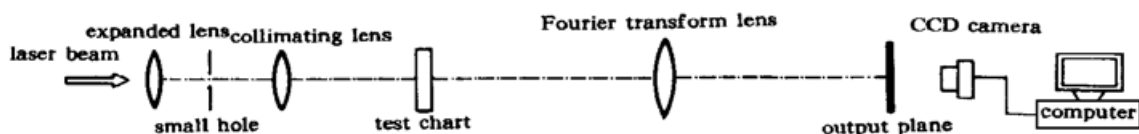


Fig. 5 An experimental system of resolving power testing of the test chart

表 1 给出负标板的整体图形、前 8 组、前 7 组和前 6 组分辨率图案功率谱最外次极点值  $R_0$  与分辨率值的对应关系, 其结果可以作为计算分辨率的判据。实验结果也可形象地由图 12 表示出。

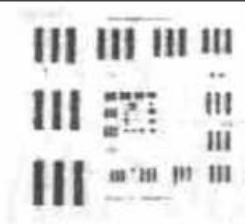


Fig. 6 A positive resolving power test chart

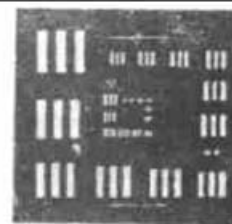


Fig. 7 A negative resolving power test chart



Fig. 8 A photograph of the positive resolving power test chart power spectrum

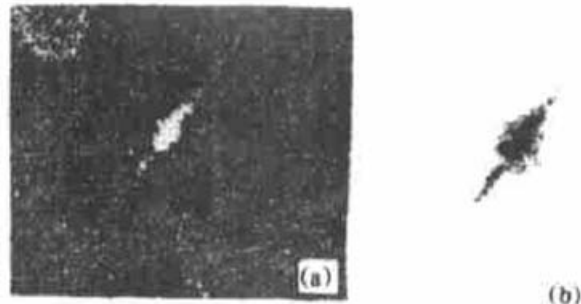


Fig. 9 A picture of the positive resolving power test chart power spectrum. (a) A positive image, (b) An opposite image



Fig. 10 A picture of the negative resolving power test chart power spectrum. (a) A positive image, (b) An opposite image

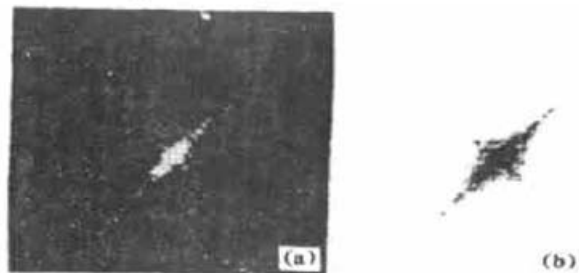


Fig. 11 A picture of the negative resolving power test chart front 2-2 group of power spectrum. (a) A positive image, (b) An opposite image

Table 1. Distribution of the negative resolving power test chart power spectrum

number	group number	resolution value/ ( cycle/ mm)	outside critical maximum coordinative value $R_0$ / mm
1	7-3	79.4	91.6
2	2-2	2.24	81.1
3	2-1	2.00	80.3
4	1-6	1.78	79.9

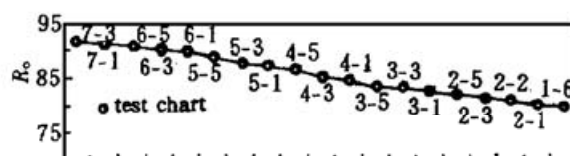


Fig. 12 The relation between the test chart power spectrum and the resolution value

**结 论** 1) 随着标板图案分辨率值的增大, 其对应功率谱最外次极点坐标值也随之增加, 这与理论分析相吻合。

2) 傅里叶变换功率谱实验能将相邻组的分辨率值区分开来, 即傅里叶变换功率谱分析法有标板图案同样的分辨能力。

3) 不难看出, 负标板的功率谱质量优于正标板的功率谱质量。这是由于正标板零频干扰太大的缘故, 这对分析功率谱次极大有影响, 但却不影响最外次极点的分布。

4) 这种标板功率谱实验的成功, 可为检验胶片的分辨率提供新的方法。

### 参 考 文 献

- [1] 感光材料分辨率的测定. 国家标准 GB9045-88, 北京: 国家标准局, 1988. 18
- [2] 杨国光. 近代光学测试技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1989. 352387
- [3] 华更新. 膛线图像分析及特征提取. 模式识别与人工智能. 1994, 7(4): 323326
- [4] 陈自宽, 张延焯等. 基于功率谱分析的指纹实时识别系统. 光学学报, 1994, 14(9): 903907
- [5] Andrew K *et al.*. Automated fingerprint recognition using structural matching. *Pattern Recognition*, 1990, 23(8): 893904

## An Evaluation Method for Resolving Power of Photographic Materials Based on Fourier Power Spectrum

Liu Tiegen      Zhang Yimo      Li Yuhua

(*Research Institute of Modern Optical Instruments, Tianjin University,  
Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science,  
Education Ministry of China, Tianjin 300072*)

Zhu Jingsi

(*Quality Control Centre, Tianjin Yuanda Photographic Material Company, Tianjin 300220*)

(Received 17 November 1999; revised 1 February 2000)

**Abstract** A criterion to determine the maximum resolving power of a resolving power test chart by using Fourier power spectrum is proposed. It is an objective evaluation method, in which the Fourier frequency spectra of the resolving power test chart are analyzed and processed according to the optical information processing principle. The mathematical model of Fourier power spectrum is derived. The relations between the resolving power of the test chart and the critical maximum are defined through theoretical calculation and analysis of Fourier power spectrum of the test chart.

**Key words** photographic testing, resolving power of photographic material, Fourier power spectrum.