

抛物面镜系统的光学图像处理

林子扬 黄乐天

(暨南大学物理系, 广州 510632)

提 要

讨论了抛物面镜的变换特性; 提出用一个凹抛物面反射镜组成光学图像处理系统, 进行了相干光, 部分相干光和白光的若干光学图像处理实验, 证明了系统的可行性, 并对系统的实用意义作了若干讨论.

关键词 抛物面镜, 光学图像处理.

反射镜系统的光学信息处理始于1970年初, 1971年Husain-Abidi首先提出一个由三个抛物面圆块组成的光学数据处理系统^[1]; 其次, Aaffer提出一个两同心球面反射镜组成的系统^[2], 接着Suzaki改用非同心的^[3]; 1983年到1985年, Spektor在反射系统中引入平面镜、反射滤波器, 改进系统, 并与计算机结合进行光学数据处理^[4~7]. 1989年报道了单凹球面反射镜作图像处理^[8].

系统简单但又不降低其处理能力, 这无疑在一定范围内应用性更强. 本文的工作是在讨论抛物面镜的变换性质的基础上, 提出用一个凹抛物面反射镜组成基本的光学图像处理系统, 通过实验, 证明系统具有良好的图像处理功能, 最后简要讨论了其实用意义.

1 抛物面反射镜的变换特性和基本处理系统

入射光波被抛物面镜反射后, 将发生振幅和位相的改变. 可以证明^[8]对镀铝反射膜的情况, 在近轴条件下, 振幅的反射率基本为一常数, 而反射相变在 10^{-2} rad数量级上. 所以, 在近轴条件下, 光波反射时只需考虑抛物面反射镜的几何形状引入的位相延迟.

如图1所示, 设旋转抛物面顶点 P 坐标为 $(0, 0, p)$, p 的大小为其焦点到准线之距, 则旋转抛物面方程为

$$x^2 + y^2 = 2p(-z + p), \quad (1)$$

$$\Delta z = p - z = (x^2 + y^2)/2p, \quad (2)$$

在 $\triangle ABC$ 中的 \overline{AB} 和 \overline{BC} 分别为

$$\overline{AB} = l_0 - \Delta z, \quad \overline{BC} = (l_0 - \Delta z) [(p/2) + \Delta z] / [(p/2) - \Delta z], \quad (3)$$

通常 $\Delta z \ll (p/2)$. 于是入射光波被反射后总的位相延迟为

$$\Delta = k(\overline{AB} + \overline{BC}) = 2kl_0 - [(x^2 + y^2)k/2f], \quad (4)$$

式中 $f = (p/2)$ 为抛物面反射镜焦距. 略去常数位相因子, 得反射函数为

$$R(x, y) = \exp[-ik(x^2 + y^2)/2f], \quad (5)$$

式中 $k = (2\pi/\lambda)$, λ 为入射光波长. (5)式为二次型纯位相函数, 设 $U_1(x_1, y_1)$ 、 $U_2(x_2, y_2)$

分别为抛物面反射镜前后焦面上场分布, 类似对透镜情况的推导, 可得抛物面反射镜前后焦面具有二维傅里叶变换关系.

$$U_2(x_2, y_2) = (\lambda f)^{-1} \tilde{A} \mathcal{F} \{U_1(x_1, y_1)\}, \tag{6}$$

式中 \tilde{A} 是一常复数因子. 根据文献[9], 在平面光波入射下, 抛物面反射镜前后焦面上的透射函数 K 和点扩散函数 h 分别可表为^[10]

$$K(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} G(x, y) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda f} [(x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y] \right\} dx dy, \tag{7}$$

$$h(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} G(x, y) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda f} [(x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y] \right\} dx dy. \tag{8}$$

根据线性系统理论

$$U_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U_1(x_1, y_1) h(x_1, y_1; x_2, y_2) dx_1 dy_1. \tag{9}$$

从(6)式~(9)式可得抛物面反射镜前后焦面之间的透射函数为

$$K(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{1}{\lambda f} \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_1 x_2 + y_1 y_2) \right]. \tag{10}$$

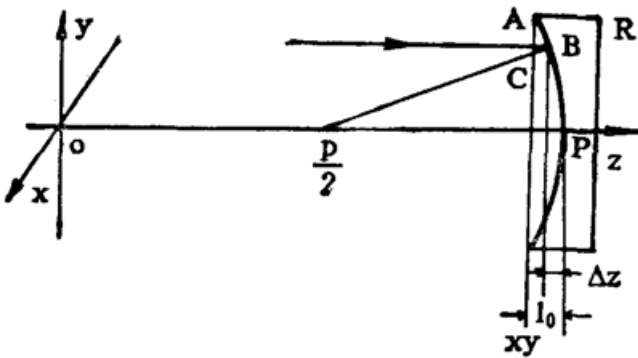


Fig. 1 R is paraboloidal mirror, P the acme of paraboloidal mirror

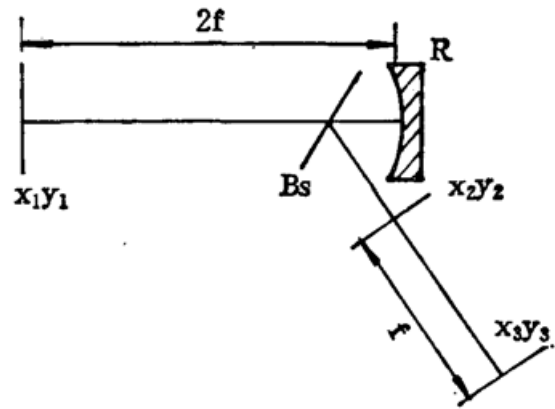


Fig. 2 R is the paraboloidal mirror, x_1y_1 expresses the plane of an object, x_2y_2 expresses the plane of frequency space, x_3y_3 expresses the plane of an image, B_s the planar half-reflecting mirror (overlooking)

根据(6)式和(10)式的变换特性, 提出一个单凹抛物面反射构成的基本处理系统, 如图2所示. B_s 是平面半反镜, 用于改变光的传播方向, 以方便处理. 在近轴条件下, 由菲涅尔公式可知 B_s 对光振幅和位相的影响基本是一常数因子, 故在讨论中略去.

2 光学图像处理系统及工作原理

本文实验所用处理系统以图2所示基本处理系统为主图像处理系统, 配相应光源构成.

2.1 相干光处理系统的工作原理

系统如图 3 所示. 由相干光获得系统和图 2 处理系统组成. 工作原理是频域处理, 设 x_1y_1 面上场分布为 $U_1(x_1, y_1)$, x_2y_2 面上场分布为 $U_2(x_2, y_2)$ 则:

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{\tilde{A}}{\lambda f} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda f} (x^2 + y^2)\right] \times \iint U_1(x_1, y_1) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_2x_1 + y_2y_1)\right] dx_1 dy_1, \quad (11)$$

$U_2(x_2, y_2)$ 是傅里叶谱; 在 x_2y_2 面上置滤波函数 $F(x_2, y_2)$ 的滤波器, 由菲涅尔衍射在 x_3y_3 面上可得图像场分布

$$U_3(x_3, y_3) = \frac{1}{(\lambda f)^2} \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda f} (x_3^2 + y_3^2)\right] \iint U_1(x_1, y_1) \left[\iint F(x_2, y_2) \times \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda f} [(x_1 + x_3)x_2 + (y_1 + y_3)y_2]\right\} dx_2 dy_2 \right] dx_1 dy_1. \quad (12)$$

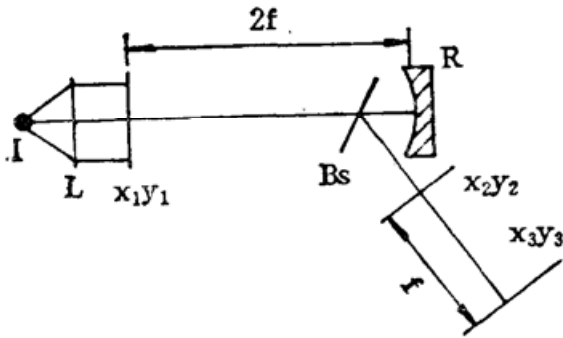


Fig. 3 I is coherent point source, L is used to get coherent parallel light, the part from x_1y_1 to x_3y_3 is the system shown in Fig. 2 (overlooking)

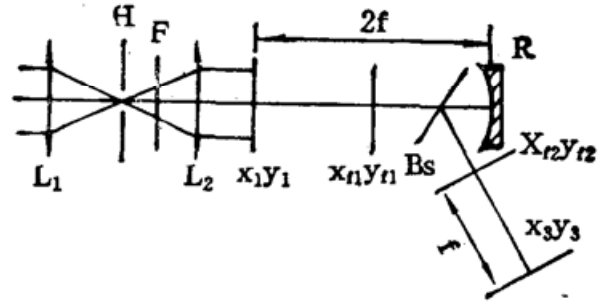


Fig. 4 The system for partially coherent light is made up of L_1, H, F and L_2, H is light source, F is interference filter, the part from x_1y_1 to x_3y_3 is the system shown in Fig. 2(overlooking).

2.2 部分相干光处理系统的工作原理

部分相干光处理系统如图 4 所示. 其工作原理基于部分相干光理论^[9]. 设 $\Gamma_1(x_1, x'_1; y_1, y'_1)$ 、 $\Gamma_{f_1}(x_{f_1}, x'_{f_1}; y_{f_1}, y'_{f_1})$ 、 $\Gamma_{f_2}(x_{f_2}, x'_{f_2}; y_{f_2}, y'_{f_2})$ 分别为 x_1y_1 、 $x_{f_1}y_{f_1}$ 和 $x_{f_2}y_{f_2}$ 平面上的互相干函数, $U_1(x_1, y_1)$ 为 x_1y_1 面上场分布, $F(x_{f_1}, y_{f_1})$ 为 $x_{f_1}y_{f_1}$ 面上滤波器的滤波函数, 则有

$$\Gamma_{f_1}(x_{f_1}, x'_{f_1}; y_{f_1}, y'_{f_1}) = \iiint \Gamma_1(x_1, x'_1; y_1, y'_1) U_1(x_1, y_1) U_1^*(x'_1, y'_1) \times K_1(x_1, x_{f_1}; y_1, y_{f_1}) K_1^*(x'_1, x'_{f_1}; y'_1, y'_{f_1}) dx_1 dx'_1 dy_1 dy'_{f_1}, \quad (13)$$

$$\Gamma_{f_2}(x_{f_2}, x'_{f_2}; y_{f_2}, y'_{f_2}) = \iiint F(x_{f_1}, y_{f_1}) F^*(x'_{f_1}, y'_{f_1}) \Gamma_{f_1}(x_{f_1}, x'_{f_1}; y_{f_1}, y'_{f_1}) \times K_2(x_{f_1}, x_{f_2}; y_{f_1}, y_{f_2}) K_2^*(x'_{f_1}, x'_{f_2}; y'_{f_1}, y'_{f_2}) dx_{f_1} dx'_{f_1} dy_{f_1} dy'_{f_2}, \quad (14)$$

$$I_3(x_3, y_3) = \iiint \Gamma_{f_2}(x_{f_2}, x'_{f_2}; y_{f_2}, y'_{f_2}) K_3(x_{f_2}, x_3; y_{f_2}, y_3) \times K_3^*(x'_{f_2}, x_3; y'_{f_2}, y_3) dx_{f_2} dx'_{f_2} dy_{f_2} dy'_{f_2}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 I_{f_2}(x_{f_2}, y_{f_2}) = & \frac{(\bar{\lambda}f)^2}{16} \left\{ \left| \iint U_1(x_1, y_1) \exp \left[-i \frac{2\pi}{\bar{\lambda}f} (x_{f_2}x_1 + y_{f_2}y_1) \right] dx_1 dy_1 \right|^2 \right. \\
 & - \iiint [1 - \Gamma_1(x_1, x'_1; y_1, y'_1)] \cdot U_1(x_1, y_1) U_1^*(x'_1, y'_1) \\
 & \left. \times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\bar{\lambda}f} (x_{f_2}x_1 + y_{f_2}y_1) \right] \exp \left[i \frac{2\pi}{\bar{\lambda}f} (x_{f_2}x'_1 + y_{f_2}y'_1) \right] dx_1 dy_1 dx'_1 dy'_1 \right\}, \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$K_1(x_1, x_{f_2}; y_1, y_{f_2}) = \frac{1}{\bar{\lambda}} \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\bar{\lambda}} \left[\frac{(x_{f_2} - x_1)^2}{2f} + \frac{(y_{f_2} - y_1)^2}{2f} \right] \right\},$$

$$K_2(x_{f_2}, x_{f_2}; y_{f_2}, y_{f_2}) = \frac{1}{\bar{\lambda}f} \exp \left[-i \frac{2\pi}{\bar{\lambda}f} (x_{f_2}x_{f_2} + y_{f_2}y_{f_2}) \right],$$

$$K_3(x_{f_2}, x_3; y_{f_2}, y_3) = \frac{1}{\bar{\lambda}f} \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\bar{\lambda}} \left[\frac{(x_3 - x_{f_2})^2}{2f} + \frac{(y_3 - y_{f_2})^2}{2f} \right] \right\},$$

式中 $I_{f_2}(x_{f_2}, y_{f_2})$, $I_3(x_3, y_3)$ 分别为 $x_{f_2}y_{f_2}$ 、 x_3y_3 平面上光强分布, $\bar{\lambda}$ 为部分相干光的平均波长. 所以当滤波器 $F(x_{f_2}, y_{f_2})$ 一定, 就可得所需图像. 当 $\Gamma_1(x_1, x'_1; y_1, y'_1)$ 较大时, (16) 式中的傅里叶谱占主要成份. 通常是设法提高 Γ_1 , 故仍是频域处理.

2.3 白光处理系统及工作原理

白光处理系统是将部分相干光处理系统(图4)内的光源获得系统中的干涉滤色片去掉即可. 系统工作的基本原理是: 相干性降低了, 但同时仍保持线性振幅运算; 换句话说, 系统在 $x_{f_2}y_{f_2}$ 平面上仍能以复振幅来处理输入信号. 为此, 编码器用于获得空间相干性; 另一方面在 x_1y_1 平面输入的图像是预先经过调制或将待处理图像和一光栅叠合一起输入, 以提高时间相干性, 这样相干光处理的原理在此仍可应用. 白光处理仍是频域处理.

3 实验及结果

实验所用镀铝膜凹抛物面反射镜的焦距为 $f=400$ mm, 相干光源为 He-Ne 激光器, $\lambda=632.8$ nm; 以高压氙灯为白光光源, 所用干涉滤光片的中心波长为 $\lambda_0=540.8$ nm, 半宽度 $\Delta\lambda=15.0$ nm.

图5~图8为相干光处理结果. 图5是滤波实验, 将图像上的周期性条纹去掉. 自相关实验采用 Vander Lugt 空间滤波法, 图6是自相关实验结果, 其中图6(b)只给出所关心的自相关点. 微分实验中, 仍采用复合光栅作滤波器, $\Delta\nu \leq 11/\text{mm}$, 结果如图7所示. 图8是散斑相减实验, 采用单狭缝作滤波器.

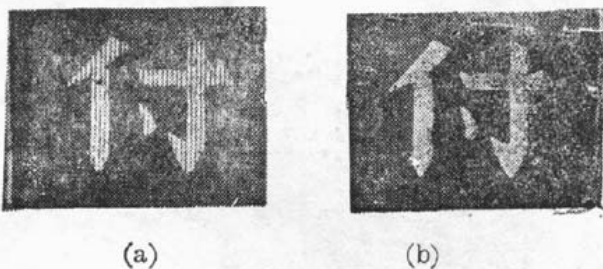


Fig. 5

- (a) The image to be processed;
(b) Filtered image

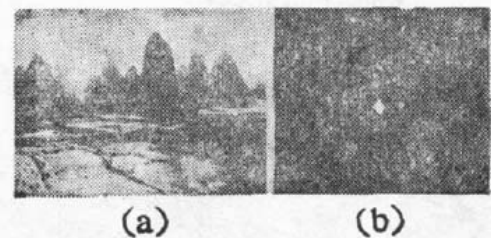


Fig. 6

- (a) The image to be processed;
(b) The point of self-correlation.

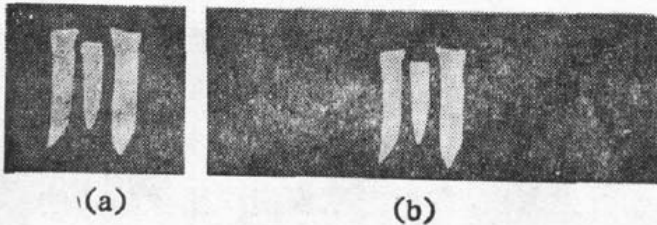


Fig. 7

- (a) The image to be processed;
- (b) Differentiated image.

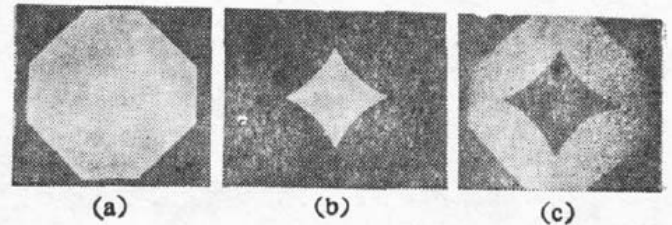


Fig. 8

- (a), (b) The image to be processed;
- (c) The image subtracted by speckle method

部分相干光微分实验结果示于图 9. 实验仍用复合光栅作滤波器, $\Delta\nu=0.81/\text{mm}$, 用单狭缝作光源编码器, 缝宽约为 $400\ \mu\text{m}$, x_1y_1 平面上 $T_1(\Delta x, 0)=0.85$.

图 10 是位相调制黑白图像等密度假彩色编码实验结果, 实验采用 $\nu=251/\text{mm}$ 的朗奇光栅进行调制. 图 11 是散斑加减白光再现实验结果, 将图 8 实验所制的散斑调制片放入白光系统输入面, 用单狭缝进行滤波得图 11 的结果.

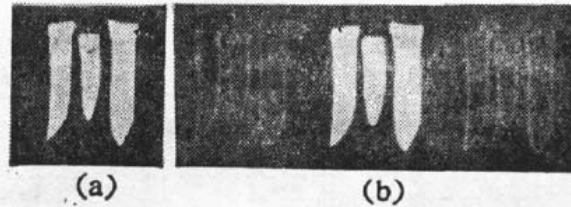


Fig. 9

- (a) The image to be processed;
- (b) The image differentiated with partially coherent light.

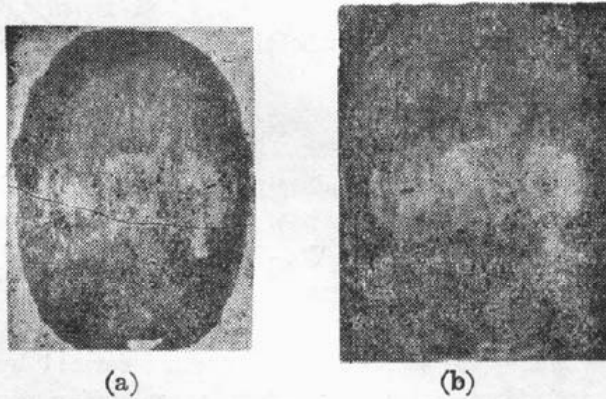


Fig. 10

- (a) The image to be processed;
- (b) The image encoded by pseudocolor encoding method.

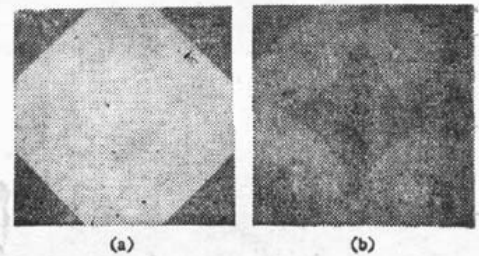


Fig. 11

- (a) Added image;
- (b) Subtracted image.

(The original photos of Fig. 10 (b), Fig. 11 are color ones)

4 讨 论

根据实验结果可看出, 所提出的基本处理系统有良好的光学图像处理能力. 基本处理系统不是 $4f$ 式的, 但以实验结果和原理(12)式可看出, 它不影响处理结果. 与 Husain-Abidi 等人的反射系统相比, 具有简单、元件少、灵活性大和易于调整的优点; 在处理较大图像时, 更易于满足近轴近似的处理条件, 且较经济. 此外, 与现在较常用的球面型元件的处理系统相比较还可看出其优越性.

1) 球面型元件(如透镜、球面镜)要获得傅里叶变换, 要求球面半径 R 远远大于图像线

度(即 $R \gg x, y$), 这限制了球面型元件对较大图像进行傅里叶变换处理。抛物面镜无此限制, 故适于较大图像的傅里叶变换处理。

2) 抛物面镜的焦点和无限远轴上点满足等光程条件, 这是一般透镜和球面镜所不及的。无限远点对应平行光束, 而光学图像处理多用平行光入射, 故用抛物面镜作图像处理的像差相对球面型的系统在同等条件下要小的多。

3) 无色差是抛物面镜固有的, 这是一般的透镜所没有的, 即使是消色差、复消色差透镜也有所不及, 所以用抛物面镜进行部分相干光白光处理比一般球面型元件要优越的多, 处理波段范围宽。

4) 在系统适用处理波段范围及图像质量方面, 以元件的制作难易来看, 球面镜加工容易, 但它难以克服单色像差, 难与组合透镜相比; 透镜虽可组合, 但要有处理波段宽且图像质量好, 则对组合透镜的设计、工艺及用材料的要求大大提高, 使造价较高; 抛物面镜, 虽有上述三点的优点, 但由于制造工艺的难度, 也降底了其性能; 如要加工面形差小于 $\lambda/10$ 的高质量抛物面镜, 加工也较难。

综上所述, 所提出的基本处理系统是有实际应用意义的, 特别是在扩展处理波段范围方面。本文的工作是初步的, 实验用的抛物面镜*面形差小于 $\lambda/10$, 目的主要是在近轴条件下与球面型的系统及多个抛物面镜系统比较, 但还有待于进一步深入研究, 特别是离轴情况及抛物面的面形差对系统的影响。

参 考 文 献

- [1] J. C. Fletcher, A. S. Husain-Abidi, Optical data processing using paraboloidal mirror segments. *US Patent, No: 3752564*
- [2] A. Offer, Unit power imaging catoptric anastigmat. *US Patent No: 3748015*
- [3] A. Suzuki, Optical device for the alignment of two superimposed objects. *US Patent No: 4167677*
- [4] Spektor, B. B, Nezhevenko, E. S, Pribylovsk, A. S, Computer optical data processor-has light divider between spatial modulator and fourier transform lens with flat mirror behind focal plane of second fourier lens. *World Patent Acc, No. 83-739486/33, (EPI/s-x):T02-A03; V07-K01*
- [5] Spektor, B. I, Optical data processor for computers-has rotating mirror with circular interference zones as spatial frequency filter. *World Patent Acc, No: 84-042280/07, (EPI/s-x): T02-A03*
- [6] Spektor, B. I, Direct-inverse fourier transformation appts-has two-pass corrector formed by two curved mirrors facing each other by their reflecting surfaces and on optical axis of reflecting surface. *World Patent Acc, No: 85-060730/10, (EPI/s-x): T02-A03*
- [7] Spektor, B. I, Analogue optical data processor-feeds light flux via modulator to focus via condenser lens onto mirror segment. *World Patent Acc, No: 85-140073/23, (EPI/s-x): T02-A03*
- [8] 何 镜, 黄乐天. 凹面反射镜系统的傅里叶变换性质. *中国激光*, 1989, **16** (2): 99~103
- [9] M. Born, E. Wolf 著, 黄乐天, 陈熙谋, 陈秉乾译. *光学原理(第五版)*, 北京: 科学出版社, 1981: 634~708
- [10] J. W. Goodwan 著, 詹达三, 董经武, 顾本源译. *傅里叶光学导论*, 北京: 科学出版社, 1979: 115~160

* 抛物面镜是中国科学院长春光学精密机械研究所加工的。

Optical image processing using paraboloidal mirror

LIN ZIYANG HUANG LETIAN

(Department of Physics, Jinan University, Guangzhou 510632)

(Received 16 February 1990; revised 30 November 1990)

Abstract

This paper deals with the transfer characteristics of paraboloidal mirror. Optical image processing system using single paraboloidal mirror is proposed. Experiments with coherent light, partially coherent light and white light processing, have proved the feasibility for the system. The practical significance for the system are discussed.

Key words paraboloidal mirror, optical image processing.