

一种猫眼列阵厩相位共轭镜的研究*

张福根 张以谟
(天津大学精仪系)

提 要

本文介绍一种由一块透镜网格板和一块平面反射镜组成的后向式猫眼列阵厩相位共轭镜 (PPCM), 并研究了它的视场大小、分辨率及信息自由度。
关键词: 猫眼列阵; 厩相位共轭镜。

一、引 言

某些光学元件的列阵具有类似于相位共轭镜 (PCM) 的功能^[1], 例如, 1:1 成像, 补偿介质不均匀造成的图像畸变等。因此这类列阵被称为厩相位共轭镜 (PPCM)。与非线性光学方法产生的“真”PCM 相比, 它具有工作面积大, 响应速度快, 造价低, 光谱响应范围广等优点, 从而受到人们的重视。自 70 年代以来, 有众多文献报道它的理论, 器件及应用方面的研究^[2~6]。本文介绍一种由透镜网格板和平面反射镜组成的后向式猫眼列阵 PPCM。与报道过的同类器件^[3~6]比, 这种器件具有单元均匀, 成像质量好, 易于制造等特点。可成为一种实用化的 PPCM。文中我们描述了该器件的结构, 并验证它的相位共轭性质; 讨论了器件内光线的串扰和器件视场的大小、导出了器件的分辨率及其随位置的变化公式, 并对后者作了定性的实验验证; 最后, 我们讨论了器件的信息自由度。

二、器件的结构及其相位共轭性质的演示

该器件由一块透镜网格板和一块平面反射镜组成 (见图 1)。网格板上每个单元都是一个独立的透镜, 光瞳呈正方形。各透镜的焦距相同, 焦平面重合。反射镜的反射面处在这个共同焦面上。这样网格板的每个格都与反射镜构成一个反射式猫眼。其全体就成为一个后向式猫眼列阵 PPCM^[1]。单元总数为 250×250 。

图 2 是用于演示该器件的相位共轭 (PC) 特性的实验装置示意图。用从卤钨灯发出的散射光照明物面。物面至器件工作表面的距离为 450 mm (任意选取), 器件的工作面积是一个 $\phi 20$ 的圆。

把分束镜置于图中实线所示的分束镜位置, 以观察成像性质, 虚线所示的分束镜位置上不置分束镜, 同时光路中不置任何相位畸变体。观察屏放在与物面对于分束镜对称的位置上。图 3 是实验照片。3(a)、3(c) 是物体, 3(b)、3(d) 是相应的像。这里像上有很弱的类似

收稿日期: 1988 年 5 月 12 日; 收到修改稿日期: 1988 年 11 月 14 日

* 本工作得到国家自然科学基金的资助。

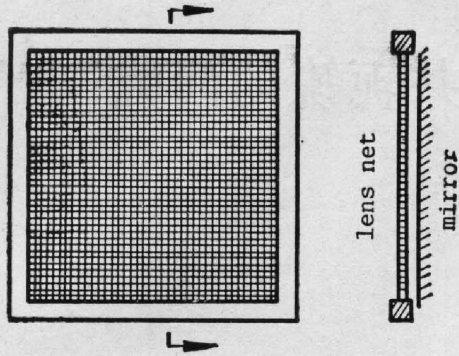


Fig. 1 The structure of the PPCM consisting of a lens net & a mirror

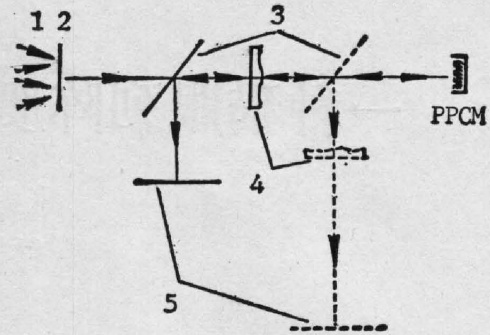


Fig. 2 An arrangement used to demonstrate the PC characteristics of the PPCM
1—illumination light; 2—object plane; 3—beam splitter; 4—distorting medium; 5—image plane;

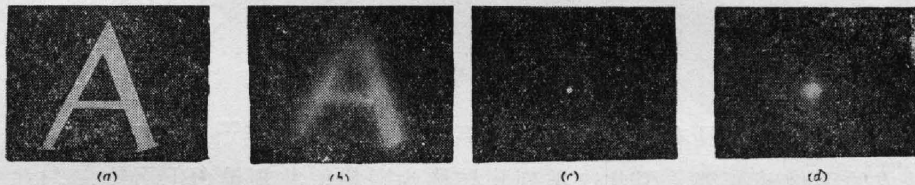


Fig. 3 The photos of the demonstration of the capability of the PPCM to image by 1:1

于重影的现象,它是由器件单元的二级衍射所产生。此外,成像还有所模糊,这主要是器件的分辨率不高所致。

把分束镜和畸变体置于各自的实线位置,把观察屏置于实线像面位置,以观察器件补偿介质畸变的能力。这时到达观察屏的光线,往返两次经过畸变介质,对应于畸变无补偿情况。图2中畸变体的虚线和实线位置对于虚线分束镜对称,以避免畸变体至像面距离不同造成的畸变效果不同。实验中我们用了两种物体。畸变介质也用两种,其一是厚瓶底;另一系用如下方法制成:在一块普通的玻璃板上涂一层502胶水,再敷上一张揉皱的透明无色塑料薄膜(用来加剧502胶水涂层厚度的不均匀性,并防止其蒸发)。这两种畸变体中前者造

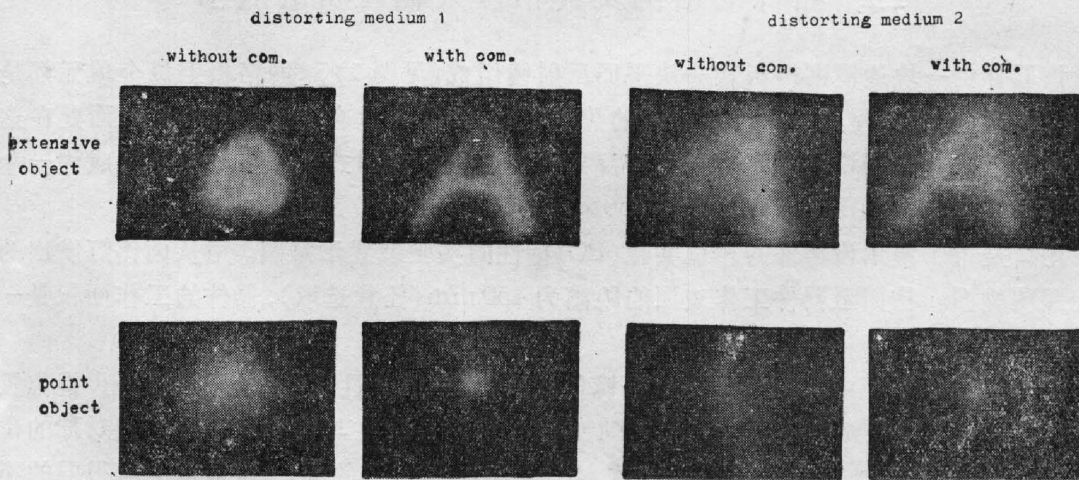


Fig. 4 The photos of the demonstration of the capability of the PPCM to compensate the medium distortion

成的光程变化幅度较大而变化率较小, 后者的变化幅度较小但变化率较大。图 4 是这组对比实验的照片。

三、器件内光线的串扰及器件的视场

为方便计, 我们把猫眼列阵的反射等效结构的一个局部示于图 5。图 5(a) 表示产生相位共轭现象的光路。若某一光线以入射角 θ 从离单元中心 x 处入射到该单元, 则该光线出射时将产生位移 Δ ,

$$\Delta = 2(f\theta - x)。 \quad (1)$$

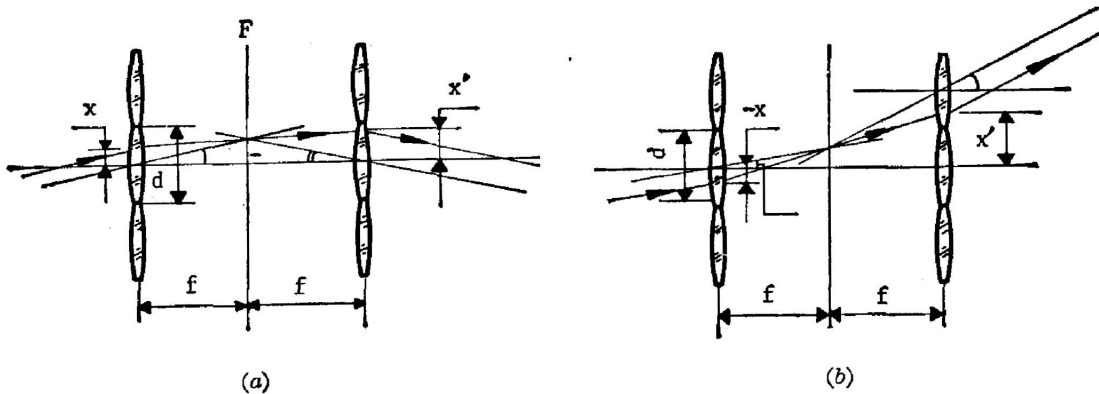


Fig. 5 Propagation of ray in the PPCM

(a) Propagation in pseudo-PC manner; (b) Propagation in 'cross-talk' manner

出射点至单元中心的距离为

$$x' = x + \Delta = 2f\theta - x, \quad (2)$$

其中 f 为透镜的焦距。同时出射角与入射角大小相等, 方向相反。这时, 应有

$$|x'| \leq d/2,$$

(见图 5(a))。(2) 式代入上式, 得

$$x \leq 2f\theta + d/2, \quad (3a)$$

且

$$x \geq 2f\theta - d/2。 \quad (3b)$$

考虑到图 5 是一种反射等效表示, 我们知道光线经 PPCM 后实际上以 Δ 的误差(见(1)式)循原路返回。这一特点就是 PPCM 能 1:1 成像, 能补偿介质畸变的原因。误差 Δ 带来像的模糊。

与以上情况相反, 如果

$$|x'| > d/2,$$

即

$$x > 2f\theta + d/2, \quad (4a)$$

或

$$x < 2f\theta - d/2, \quad (4b)$$

则光线将从相邻单元射出, 而不能沿同方向返回(见图 5(b))。我们不妨把这种情况称为“串扰”。串扰光线的出射角为

$$\theta' = \begin{cases} (\theta/|\theta|)[(d/f) - |\theta|], & \theta \neq 0, \\ \text{无串扰} & \theta = 0. \end{cases} \quad (5)$$

其实,当 $\theta \neq 0$ 时,只有从单元的某一部分面积(下称单元的有效面积)上入射的光,能以共轭方式出射,从其余部分入射的光均成为串扰光。

先设 $\theta \geq 0$ 。由于光线入射到任何一个单元时,入射点到单元中心的最大距离为 $d/2$,所以(3a)式自然满足。(3b)式则决定了共轭光线的最低入射位置 $x_L(-2f\theta - d/2)$ 。从而得单元的有效宽度为

$$d' = d/2 - x_L = d - 2f\theta。$$

考虑到 $\theta < 0$ 情况,上式应推广为

$$d' = d - 2f|\theta|。 \quad (6)$$

(6)式表明,随着入射角绝对值的增大,单元的有效宽度线性地减小。当

$$|\theta| = d/2f \equiv \theta_0 \quad (7)$$

时, $d' = 0$ 。此时器件对入射光不再有相位共轭作用。所以,器件的视场角为 $2\theta_0 = d/f$ 。对

我们设计的器件而言, $d = 0.4 \text{ mm}$, $f = 1.6 \text{ mm}$,故 $\theta_0 = 0.25$ 。

参考图 6,并利用(5)、(7)两式,可求得,当物面至器件的距离为 L 时,视场宽度为

$$v' = dL/f + w,$$

其中 w 表示器件作用面的宽度。但是其中只有图中的斜影线部分不受串扰光的干扰,其宽度为

$$v = dL/f - w。 \quad (9)$$

如果 $2\theta_0 = d/f \gg w/L$,则

$$v' \approx v \approx dL/f。 \quad (10)$$

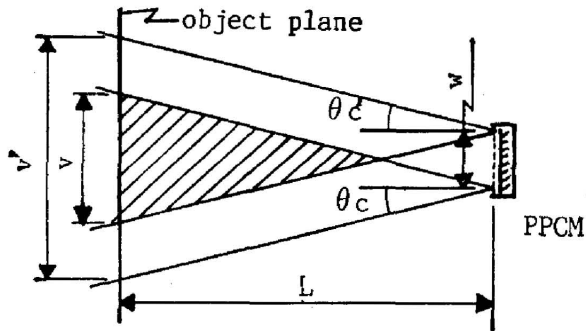


Fig. 6 The field of view of the PPCM

四、PPCM 作为传像器件的分辨率和信息自由度

文献[7]、[8]分别研究了 PPCM 的几何像差和衍射效应,指出它们引起的点扩散宽度分别是

$$h_G = 2d \quad \text{和} \quad h_D = 2\lambda L/d,$$

其中 d , λ , L 分别表示器件单元的宽度,入射光的波长和物面至器件的距离。对本文所给的器件来说,应该用有效值 d' 代替 d 。因此器件的综合分辨宽度近似为

$$h \approx h_G + h_D = 2d' + 2\lambda L/d'。 \quad (11)$$

当

$$d' = (\lambda L)^{\frac{1}{2}} \equiv d'_m \quad (12)$$

时, h 取最小值,

$$h = 4d'_m = 4(\lambda L)^{\frac{1}{2}} \equiv h_{\min}。 \quad (13)$$

(13)、(12)两式表明,如果减小物体到器件的距离,并相应减小器件的有效宽度(通过调工作角,参考(6)式),在单元的实际宽度已给定的情况下,仍可获得任意窄的分辨宽度。但须注意,光能的利用率也随之线性地减小。

图 7 中, OX 表示物面(与像面重合),与 PPCM 作用面平行,二者相离 L 。设作用面宽度 W 足够窄,满足 $w/L \ll 2\theta_0$,那么器件的视场宽度可由(10)式表示,并且物面上的任意一点 $P(x)$ 发出的光对器件各单元的入射角近似相等。

$\theta = -x/L$ 代入(6)式,得,

$$d' = d - |x|2f/L. \quad (14)$$

(14)式代入(11)式,记 $h' = h/2d$, $x' = 2|x|/v$, $\alpha = (\lambda L)^{1/2}/d$,得,

$$h' = 1 - x' + \alpha^2/(1 - x'), \quad (15)$$

其中 $0 \leq x' < 1$ 。上面我们还利用了(10)式。当 $x' = 0$ 时, $h' = 1 + \alpha^2$; 当 $x' \rightarrow 1$ 时, $h' \rightarrow \infty$, 这时器件实际上已没有分辨能力。

$h' \sim x'$ 曲线示于图 8。若 $\alpha < 1$, 则当 $x' = 1 - \alpha$ 时, h' 取最小值 h'_{\min} ,

$$h'_{\min} = 2\alpha_0$$

在物面的这一位置上,器件有最高分辨率。所以,在区间 $(0, 1 - \alpha)$, 器件分辨率随坐标 x' ($= |x|/2d$) 的增大而增大,而在区间 $(1 - \alpha, 1)$, 分辨率随 x' 的增大而减小。

若 $\alpha > 1$, 则 h' 在 x' 的整个定义域内单调递增,器件在视场中心($x' = 0$)有最高分辨率。

为验证分辨率分布的以上理论推断,我们进行了相应的实验。装置如同 1:1 成像实验。PPCM 的作用面是 $\phi 3\text{mm}$ 的圆。 $L = 200\text{mm}$, $d = 0.4\text{mm}$, $f = 1.6\text{mm}$, 故 $v = dL/f = 50\text{mm} (\gg 3\text{mm})$ 。照明光由普通卤钨灯发出,若以平均波长 $\lambda = 0.55\ \mu\text{m}$ 计, $\alpha = 0.82$ 。与之对应的分辨宽度分布见图 8。

与之对应的分辨宽度分布见图 8。

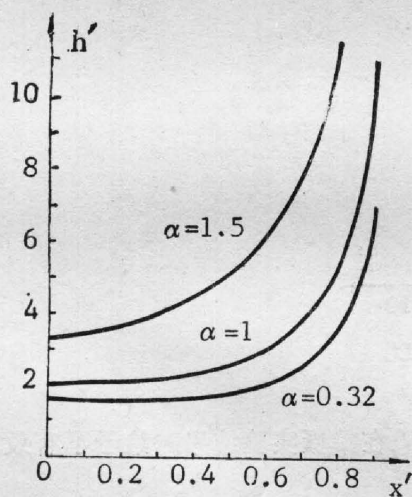


Fig. 8 The curves of $h' \sim x'$ for $\alpha = 0.82, 1, 1.5$

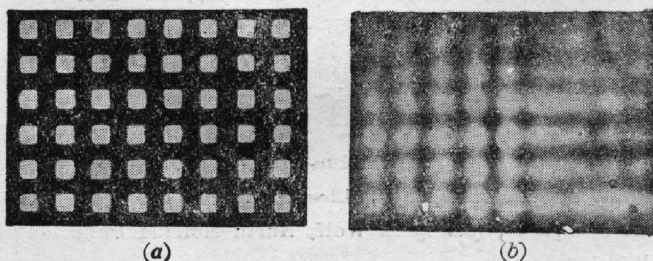


Fig. 9 The photos of the experiment result to demonstrate the distribution of the resolving power of the PPCM

(a) The tested object; (b) The resultant image

实验结果示于图 9, 其中 9(a) 表示物体, 是一个方格网。方格边长 1mm, 相邻方格中心相距 2mm, 视场中心在网的左下角。9(b) 是 9(a) 的像。照片表明, 器件在同一物面上的分辨率分布有如下特点: 随着到视场中心距离的增加, 开始时分辨率没有明显变化。大约从第 5 个网格开始, 分辨率迅速下降。这种规律与图 8 所示的曲线定性地吻合。只是实验给出的分辨率下降速度比理论值大, 这可解释为, 实验中长波长的光谱成份使分辨率下降速度加速。

利用上述结果, 可求得器件的信息自由度^[9]。对一维情形, 器件能分辨的线元数为

$$N = \int_{-v/2}^{v/2} \frac{dx}{h} = 2 \cdot \frac{v}{2} \cdot \frac{1}{2d} \int_0^1 \frac{dx'}{h'} = \frac{v}{4d} \ln \left(1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)。$$

上面利用了(15)式。将 $\alpha^2 = \lambda L/d^2$ 及(10)式代入, 得

$$N = ML' \ln(1 + 1/L'), \quad (16)$$

其中, $M = d^2/4f\lambda$, $L' = (\lambda/d^2)L$ 。容易证明, N 随 L' 单调增加。当 $L' \rightarrow \infty$, $N = M = d^2/4f\lambda = N_{\max}$ 。图 10 表示了 $N/M \sim L'$ 曲线。在二维情形, 自由度为 N^2 。对本文介绍的器件参数而言, $N_{\max}^2 = 1731$ 。

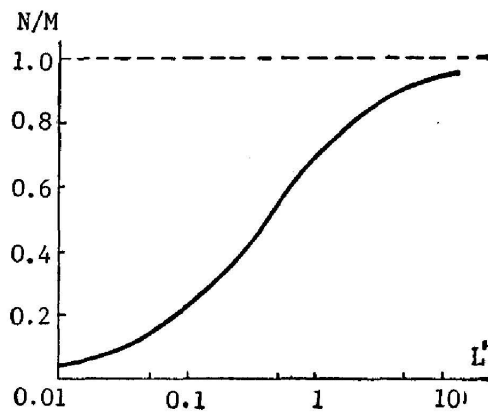


Fig. 10 The curve of $N/M \sim L'$

致谢 林玉驹老师为实验提供了透镜网格板, 齐龙同志在拍摄实验结果时给予了有效的帮助, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 王绍民;《杭州大学学报》, 1984, 11, No. 1 (Jan), 79.
- [2] S. F. Jacobs; *Optical Engineering*, 1982, 21 No. 2 (Mar/Apr), 281~283.
- [3] 王绍民等;《物理学报》, 1983, 32, No. 10 (Oct), 1357~1359.
- [4] 王绍民等;《应用激光》, 1983, 3, No. 5 (Oct), 27.
- [5] 黄维实等;《中国激光》, 1983, 10, No. 3 (Mar), 191~192.
- [6] 马建等;《物理》, 1985, 14, No. 8 (Aug), 491~492.
- [7] 王绍民等;《光学学报》, 1984, 4, No. 12 (Dec), 1119~1123.
- [8] 周国生等;《物理学报》, 1984, 33, No. 5 (May), 612~620.
- [9] D. Gabor; "Progress in Optics", (ed. by E. Wolf, North-Holland Publishing Company, Amsterdam-Oxford, 1961), Vol. 1, 109.

Study on a pseudo PPCM of cat's eye array

ZHANG FUGEN AND ZHANG YIMO

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University)

(Received 12 May 1988; revised 14 November 1988)

Abstract

This paper describes a pseudo phase conjugation mirror (PPCM) of backward cat's eye array, which consists of a lens net and a mirror. The range of the field of view, the resolving power and the information freedom degree of the PPCM are studied.

Key words: cat's eye array; pseudo phase conjugation mirror.

中国光学学会第三届理事会在沪召开

1989年6月5日到8日在上海复旦大学东苑专家招待所召开了中国光学学会第三届理事会议暨学术报告会。到会理事55名,超过105名全体理事半数以上。会上王大珩理事长作了“中国光学学会第二届理事会工作报告”,赖琮瑜秘书长作了“第二届理事会财务报告”,王之江副理事长作了“修改学会章程报告”,选举办公室作了“关于选举第三届理事工作情况报告”。与会理事讨论了这些报告,原则上通过了学会章程的某些条款,对有争议的条款,责成学会办公室整理后用通信方式,征集全体理事的意见。

与会理事初选了常务理事候选人共26名,用通信方式,由全体理事不等额选举常务理事21名,以及选出理事长、副理事长、秘书长等五名候选人。

会议期间进行了部分学术报告。论文准备出中、英文版专集。王大珩理事长在会上作了题为“从全息到智能化”的学术报告,引起到会代表的极大兴趣和重视。

(乙 民供稿)