

光学元件列阵的准相位共轭特性

肖国华 宋如华 乐时晓

(电子科技大学, 成都)

摘要: 光学元件列阵的准相位共轭特性使其能消除波前畸变和介质扰动, 成为真正实用的准相位共轭器。因此, 近年来这方面的理论和实验研究进展迅速。本文从几何光学和波动光学两方面概述其基本原理, 并对实验进展和实际应用作一综述。

Pseudoconjugation of optical arrays

Xiao Guohua, Song Ruhua, Le Shixiao

(University of Electronic Science and Technology of China)

Abstract: The optical arrays, which can compensate the medium distortion, have been used as a new optical device pseudoconjugator, and have been developed in previous years. Both theories and experiments in this domain are reviewed.

一、前言

近年来出现的相位复共轭光学(可分为非线性相位共轭和准相位共轭)对实时适应光学、非线性激光光谱学、光学信息处理、光学成像、超低噪声探测、光开关、光计算机、干涉仪和激光腔等领域的研究具有重要意义。而准相位共轭以其工作面积大、响应速度快、价廉易得、能工作于白光和无源被动等引人注目的优点成为真正实用的相位共轭器件。

通常的线性光学单元的成像是“高斯”的, 但是, 光学列阵的成像是“非高斯”的, 所以在某些情况下, 使用复合式光学列阵和光波多次通过畸变介质的方法, 能对各种类型的介质畸变进行补偿作用, 实现准光学相位共轭效应。本文就光学元件列阵的准相位共轭理论和实验及应用作一综述。

二、光学列阵成像特性理论

列阵的准相位共轭理论分两大部分: 光线光学理论即矩阵理论, 波动光学理论即衍射理论。

为描述相位共轭镜的运转特性, Yariv等^[1]引入了光线变换矩阵:

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

王绍民等^[2]则提出描述相位共轭镜对光束的变换矩阵:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/\rho & 1 \end{bmatrix} \quad (2a)$$

式中, ρ 为光束波阵面曲率半径, 球面波条件下相当于物距 u 。

宋如华等^[3]则导出另三种描述相位共轭镜对高斯光束的变换矩阵:

$$M_1' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2i/r & -1 \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$M_2' = \begin{bmatrix} 1 & -ik\omega_0^2 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2c)$$

$$M_3' = \begin{bmatrix} 1 & -rk\omega_0^2/\rho \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2d)$$

式中, k 为波矢, ω_0 为光腰半径, $r = (k\omega_0^2) / 2$, ω 为光束半径。

王绍民利用光线光学的近轴理论, 详细地分析了线性单元列阵的成象特性^[4], 得到了列阵综合成象的光线变换矩阵:

$$\begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{R+b-l}{R} & b \\ \frac{d \mp 1}{R} & d \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, R 为列阵分布的曲率半径, l 为列阵的纵向厚度, a 、 b 、 c 、 d 则为组成列阵的单元变换矩阵元。式中正负号的上方适用于折射列阵, 下方适用于反射列阵。

为了使用方便及深刻揭示物理本质, 可进一步将列阵变换为:

$$\begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{(d \mp 1)/R}{\left(\frac{R+b-l}{R} + \frac{b}{u}\right)} + \left[\frac{d}{\frac{R+b-l}{R} + \frac{b}{u}} - 1 \right] & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, u 为物距, 并有 $a_2 d_2 - b_2 c_2 = 1$ 。

当 $R = \infty$, 选

$$a = d \begin{cases} \text{当 } a = d = 1 \text{ 时, } b = 0, c \neq 0 \\ \text{当 } a = d = -1 \text{ 时, } c = 0, b \neq \infty \end{cases}$$

这样的元件组成列阵, 则(4)式变为:

$$\begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{u} & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

(5) 式与王绍民〔2〕引入的相位共轭镜对光束的变换矩阵形式完全一致, 由此深刻揭示出光学单元列阵的准光学相位特性, 还需说明的一点是由上可知, 任何一个作为相位共轭器的列阵均等效于一面曲率等于入射波波前曲率的球面镜(反射型)或一片焦距等于曲率半径之半的透镜(折射型), 完全随机, 是真正的自适应。

此外, 周国生等〔5〕利用 $ABCD$ 矩阵形式的菲涅耳积分公式〔6,7〕, 获得了由任意光学元件组成的大曲率半径球形光学列阵的综合成象象距公式:

$$v = \frac{u \left(\frac{R+l-b}{R} \right) + b}{u \left(\frac{1-d}{R} \right) + d} \quad (6)$$

(6) 式与矩阵光学的 $ABCD$ 公式比较可得光线变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} \frac{R+l-b}{R} & b \\ \frac{1-d}{R} & d \end{pmatrix} \quad (7)$$

(7) 式与(3)式本质相同, 由此可知菲涅耳衍射理论导出的这类矩阵同样可以补偿列阵附近介质的畸变, 具有准相位共轭特性, 并为新型的球形列阵提供了衍射理论基础, 从而可应用于各类光学列阵设计。

周国生、王绍民等〔8〕还分析了夫琅和费衍射条件下光学列阵的准相位共轭理论。利用 $ABCD$ 矩阵元形式的菲涅耳公式及矩阵元 $B=0$ 的条件可得列阵输出平面上的场:

$$h_2(x_2, y_2; x_0, y_0) = (i/\lambda B) e^{-ikl'} \int_{-a_1}^{a_1} \int_{-a_1}^{a_1} d\xi_1 d\eta_1 h_1(x_1, y_1; x_0, y_0) \cdot \exp \left\{ -\frac{i\pi}{\lambda B} [A(\xi_1^2 + \eta_1^2) - 2(\xi_1 \xi_2 + \eta_1 \eta_2) + D(\xi_2^2 + \eta_2^2)] \right\} \quad (8)$$

式中, x_0, y_0 表示光线发出点坐标, x_1, y_1 表示输入平面上点的坐标, x_2, y_2 表示对应于输入平面上的点在输出平面上的坐标, l' 是光学单元轴向光程长, a_1 是光学单元的输入尺寸。

对此场运用夫琅和费理论分析: 当象、物距相等即 $v=u$, 且单元的光线变换矩阵元 $A=-1$, 并设计列阵使 $2\pi a_1(\lambda u)$ 足够大(a_1 是列阵参数)时, 可得在象平面 $v=u$ 上, 场分布与物分布相同, 只差相位因子及多元干涉因子项。这些相位因子与畸变介质有关, 可证明在一定条件下〔8〕适当选取列阵单元, 当光线往复通过畸变介质或通过与列阵对称的畸变介质, 就可补偿介质引起的畸变, 呈准相位共轭特性。

上述光线理论是在傍轴近似下得到的。该理论的缺陷在于: (1)只适用于傍轴近似, 而实际列阵一般不得作此近似; (2)该理论认为一些不同单元的列阵可得到相同的相位共轭特性。实际上不同的列阵组成的准相位共轭器其补偿能力是不同的。为了得到较一般的列阵成象理论, 宋如华等〔9〕由光线光学的一般理论出发, 根据失调系统的矩阵理论〔10〕得到单元成象象点的象距:

$$v = \frac{(au+b) + \left(\alpha - \frac{\beta}{R}\right) u \sin c(\gamma_1')}{(cu+d) + \left(\gamma - \frac{\delta}{R}\right) u \sin c(\gamma_1')} \quad (9)$$

式中, α 、 β 、 γ 、 δ 为失调矩阵元, γ_1' 代表物点所发光线的角度。

由(9)式可知,对一般情况,象距不仅同物距、单元变换矩阵元有关,而且同入射光线倾角有关,因此,列阵各单元的严格综合成象点是不存在的,这一结论修正了文献〔4〕的结论。在傍轴近似 $\sin c(\gamma_1') = 1$ 时,(9)式变为:

$$v = \frac{(au+b) + \left(\alpha - \frac{\beta}{R}\right) u}{(cu+d) + \left(\gamma - \frac{\delta}{R}\right) u} = \frac{\left(\frac{R+b-l}{R}\right) u + b}{\left(\frac{d \mp 1}{R}\right) u + d} \quad (10)$$

相应的综合成象光线变换矩阵为:

$$M' = \begin{pmatrix} \frac{R+b-l}{R} & b \\ \frac{d \mp 1}{R} & d \end{pmatrix} \quad (11)$$

(11)式和(4)式完全一致,由此证明(9)式包括了傍轴近似下的结论。

实验证明〔9〕,大尺度平面列阵的成象只有近似的相位共轭特性,只有在傍轴近似下才有较完善的相位共轭特性,所以前者对于实际光学列阵的设计,在目前研究水平下具有较大指导作用。

三、列阵的相位共轭补偿验证及可能应用

随着光学列阵的准相位共轭特性理论不断发展,列阵的相位共轭补偿实验研究也受到人们的普遍重视。

早在1978年,Orley等〔11〕利用后向角反射器列阵作为激光谐振腔一端,动态校正了铍玻璃激光腔内的光学不均性。

1980年Mathieu等〔12〕利用后向反射准共轭器和普通平面镜构成光腔,结果揭示出后向反射列阵对柱形透镜引起的畸变的较好补偿。

国内这方面的实验工作进展也很快。1979年,昆虫复眼的综合成象已在实验中得到〔13〕,它不但证实了相位共轭补偿作用,而且据此我们至少可设计一种无穷景深的摄像镜头。

宋如华等〔9〕用直角圆锥反射器列阵进行了消除波前畸变的实验。周国生等〔14〕实验证明准相位共轭列阵能获得近衍射极限的畸变补偿。并且据此可望设计出一种超广角镜头。

除了直角反射列阵外,透明微珠列阵在一定条件下也可具有准相位共轭特性。黄维实等〔15〕利用现成的微珠屏作反射镜,反射波具有相当近似的准相位共轭特性,在入射光和微珠屏具有相当大的角度范围内仍可较好地证明玻璃微珠列阵的补偿畸变能力。

王绍民等〔16〕通过实验验证了GRIN光纤列阵的成象是非高斯的。进一步,他们观察了GRIN光纤列阵补偿因折射率不均所引起的波前畸变的能力。该实验验证了一种新型的前向

作用的准相位共轭器，它在微型复印机研制中可望得到较大应用。

最近张福根等^[17]对后向式猫眼列阵的准相位共轭器特性进行了实验研究。该器件由一块透镜网格板和一块平面反射镜构成，网格板的每格都与反射镜构成一个反射式猫眼，其全体成为后向式猫眼列阵PPCM（光学准相位共轭镜）。这种器件以其较好的畸变补偿能力及单元均匀、成象质量高和易于制造，可成为一种实用化的PPCM。

光学列阵准相位共轭器除了以上应用外，还已应用于研究激光腔的折射率畸变，用直角反射器列阵构成的相位共轭光腔，已获得补偿因折射率不均而产生的波前畸变的能力。此外，在光的大气传输下位相补偿等领域亦可望得到应用。

四、结 束 语

综上所述，光学元件列阵具有相位共轭特性，即具有部分补偿光学相位畸变的能力。诸多实验从不同角度，用不同器件均验证了这一点。

对光学元件列阵，人们已揭示出它的许多特性，在实验中也已取得了许多新结果。但有关光学元件列阵的完整成象理论尚未建立，因此，无论从几何光学或波动光学角度出发，关于光学元件列阵的研究是大有潜力的。

参 考 文 献

- [1] Yarriv A, IEEE, 1978; QE-14(9): 650
- [2] Wang Shaomin et al., Opt.Comm., 1982; 41: 306
- [3] 宋如华, 科学通报, 1987; 9: 719
- [4] 王绍民, 杭大学学报(自然科学版), 1983; 10: 476
- [5] 周国生等, 物理学报, 1984; 33(5): 618
- [6] Collins Jr S A, J.Q.S.A., 1970; 60: 1168
- [7] 范慎元, 光学学报, 1981; 1: 395
- [8] 周国生等, 光学学报, 1984; 4(10): 887
- [9] 宋如华等, 光学学报, (待发表, 已录用)
- [10] Genard A, Burch J M, Introduction to Motrix Methods in Optics, John Wiley & Sons, 1975
- [11] Orlov V K et al., Sov.J.Q.E., 1978; 8(6): 799
- [12] Mathieu P et al., Appl.Opt., 1980; 19: 2262
- [13] 中科院生物物理所昆虫复眼光学信息加工组, 生物化学与生物物理进展, 1979; 3: 45
- [14] 周国生等, 生物物理学报, 1985; 9: 132
- [15] 黄维实等, 中国激光, 1983; 10(3): 191
- [16] 王绍民等, 物理学报, 1983; 10: 1357
- [17] 张福根等, 光学学报, 1989; 9(8): 699

* * *

作者简介: 肖国华, 男, 1969年出生。应用物理专业1990年应届毕业生。
宋如华, 男, 1962年出生。讲师。现从事物理教学及光学研究工作。

光盘动态测试

巩马理

(西南技术物理研究所, 成都)

潘龙法 徐端颐 金国藩

(清华大学精密仪器系, 北京)

摘要: 本文提出了一种用四象限光探测器实时测量光盘动态特性的方法, 测量了旋转光盘的起伏和倾斜, 分析了测试结果及影响测量误差的各种因素。本方法具有实时、简单的特点。

Dynamic testing of optical disk

Gong Mali

(Southwest Institute of Technical Physics)

Pan Longfa, Xu Duanyi, Jin Guofan

(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University)

Abstract: By utilizing quadrant detectors, a dynamic testing method for optical disk is proposed. The disk's height variation and tilt are measured under driven by the motors of disk driver. The analysis of the results is made with a brief discussion on the error in measurement.

一、引言

光盘存储是一种密度高、容量大和价格低的新型光学信息存储技术, 其基本方法是利用光学方法在记录介质(光盘)上实现信息的记录与读出。光盘驱动器工作时, 光盘高速旋

乐时晓, 男, 1933年出生。教授。现从事激光研究工作。

收稿日期: 1989年12月6日。

收到修改稿日期: 1990年1月10日。