

文章编号: 0253-2239(2001)11-1326-05

共光路共模块自适应光学系统中 厩相位共轭器件应用分析

侯 静^{1), 2)} 姜文汉¹⁾ 凌 宁¹⁾

1), 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209
2), 国防科技大学理学院, 长沙 410073

摘要: 研究了角反射器阵列形成厩相位共轭波的能力, 计算了其对泽尼克多项式表示的各阶像差的保真度; 分析了在共光路共模块自适应光学系统中角反射器阵列与哈特曼-夏克波前传感器二者之间单元数目、位置匹配方面的问题, 对失配所带来的误差进行了计算。

关键词: 自适应光学; 厩相位共轭器件; 角反射器阵列; 哈特曼-夏克波前传感器
中图分类号: TP202+.7 文献标识码: A

1 引 言

利用角反射器阵列的反射特性, 使之作为厩相位共轭器件早在 70 年代末 80 年代初就已提出, 并有实验验证^[1~3] 其厩相位共轭波有较好的波前畸变校正效果。在共光路共模块(CP/CM)的自适应光学系统^[4]中, 使用角反射器阵列作为厩相位共轭器件的系统示意图如图 1 所示, 主要由激光器、共模块哈特曼-夏克(H-S)波前传感器、波前校正器件变形镜(DM)、相位共轭器件、控制系统等组成, 其中共模块哈特曼-夏克波前传感器中包括两个哈特曼-夏克传感器, 一个用于探测主激光的波前像差, 另一个用于探测信标光的波前像差。相位共轭器件是用一个角反射器阵列实现的。该系统具有光束净化、校正大气湍流、自准直、能校正分光镜热变形、校正内部光路内的扰动引起的像差和降低光学元件制造精度要求等优点, Kenneth^[4]对系统的功能实现原理进行了详细的分析。

此时, 一方面我们关心角反射器阵列作为厩相位共轭器件的保真度如何, 这关系到是否能利用厩相位共轭波进行波前校正, 校正效果如何; 另一方面需分析角反射器阵列与哈特曼-夏克波前传感器的匹配问题, 因为这关系到探测结果是否能作为相位共轭波的信息进行波前复原。本文对角反射器阵列形成用各阶泽尼克多项式表示的像差波前的相位共轭波的能力即保真度进行了计算, 分析了角反射器

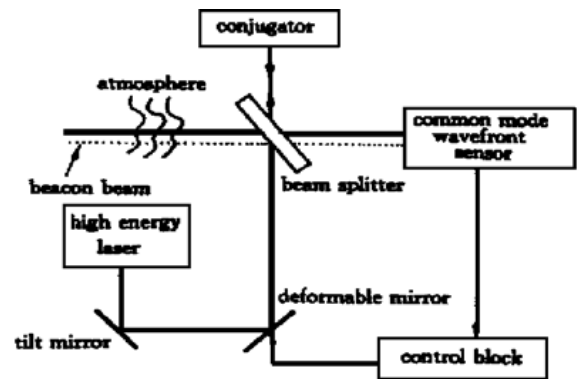


Fig. 1 Common path/ common mode design

阵列结构对保真度的影响; 同时也讨论了角反射器阵列与哈特曼-夏克传感器二者间在单元数目、位置匹配方面的问题, 对失配所带来的误差进行了计算, 这对波前系统的设计与分析十分有用。

2 角反射器阵列形成相位共轭波的保真度分析

对单一的角反射器而言, 设入射波为 $E_1(x, y)$, 则出射波是入射波关于中心的完全倒置

$$E_2(x, y) = E_1(-x, -y). \quad (1)$$

对于只有倾斜像差的入射波而言, 出射波是其相位共轭波; 对于任意像差的入射波, 角反射器阵列将其细划分为许多小的区域, 如每一个小区域上可以近似认为是只有倾斜误差的平面波, 出射波 $E_2(x, y)$ 则可近似认为是

$$E_2(x, y) \approx E_1^* P(x, y), \quad (2)$$

其中,

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n \exp\{j[2\varphi_0(x^i_0, y^i_0)]\} t(x - x^i_0, y - y^i_0),$$

$\varphi_0(x, y)$ 为入射波的相位因子, (x^i_0, y^i_0) 是第 i 个角反射器单元的中心位置, $t(x, y)$ 是角反射器单元的孔径函数。由于角反射器阵列的实质还是反射型的器件, 所以有 $P(x, y)$ 的存在, 它表示了单元与单元之间存在由原像差和反射决定的位相延迟, 称之为“平移效应”。如果我们忽略“平移效应”, 则有 $E_2 \approx E_1^*$, E_2 被称为厯相位共轭波。

为了比较角反射器阵列对于不同阶次像差的波前的保真度, 我们定义

$$R = \frac{\sqrt{\iint [\varphi(x, y) - \varphi_0(x, y)]^2 dx dy}}{\sqrt{\iint \varphi_0^2(x, y) dx dy}}, \quad (3)$$

其中 $\varphi(x, y)$ 为厯相位共轭波的相位因子, $\varphi_0(x, y)$ 为相位共轭波的相位因子。 R 越小保真度越好, 形成的厯相位共轭波越接近于相位共轭波。

我们对前 65 阶泽尼克多项式表示的像差的情况做了计算, 结果如图 2 所示, 其中分别对阵列数为 1×1 、 5×5 、 10×10 、 20×20 的角反射器阵列作了计算, 单元形状为正方形。

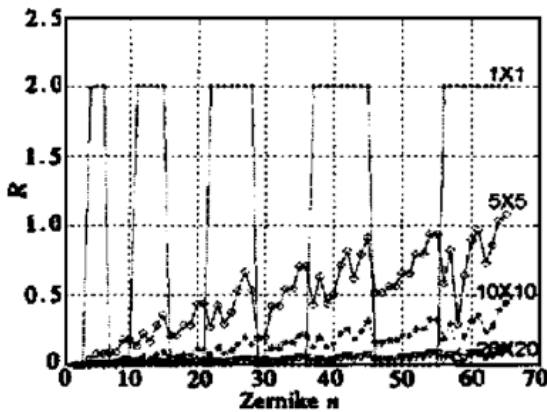


Fig. 2 The estimation factor R versus Zernike mode number n of aberrations, when the cell number of retroreflector array are 1×1 , 5×5 , 10×10 , 20×20 respectively

可以看出:

1) 阵列数为 1×1 的情形是单个角反射器的情形。对于奇函数形式的像差波前, 厯相位共轭波与理想相位共轭波完全相同, $R = 0$; 偶函数的情形:

$$R = \frac{\sqrt{\iint [2\varphi_0(x, y)]^2 dx dy}}{\sqrt{\iint \varphi_0^2(x, y) dx dy}} = 2.$$

2) 泽尼克多项式阶数等于 2、3 时为倾斜像差, 无论阵列数的多少, 厯相位共轭波都能与理想相位

共轭波完全相同, 这是因为在任意大小的单元尺寸内倾斜像差都是平面波。

3) 对于任一阶像差, 随着阵列单元数的增加, 厯相位共轭波与理想相位共轭波越逼近, 角反射器阵列的保真度越高。

4) 角反射器阵列形成厯相位共轭波保真度的高低, 不遵循像差阶数越高保真度越低的规律。阵列数大于 1 时, 保真度的高低与像差函数的奇偶性质无关, 仅取决于在单元尺寸内波前用平面波近似的程度。

5) 由相位共轭原理, 相位共轭波再次通过同样的扰动介质, 波前畸变将得到补偿。角反射器阵列形成厯相位共轭波的保真度反映了厯相位共轭波进行波前校正与补偿的能力, 即波前校正剩余残差的大小与厯相位共轭波和相位共轭波的波前差值的大小应该相同。

另外, 我们又对不同单元形状的角反射器阵列的保真度作了比较。单元形状不同则对波前实施倒置的区域划分有所不同, 对全口径的填充情况也有所不同, 因而会造成其保真度的不同。如图 3 所示, 纵坐标仍是 R 值, 在相同全口径、相同单元面积的情况下, 正方形底面的情形优于六边形。

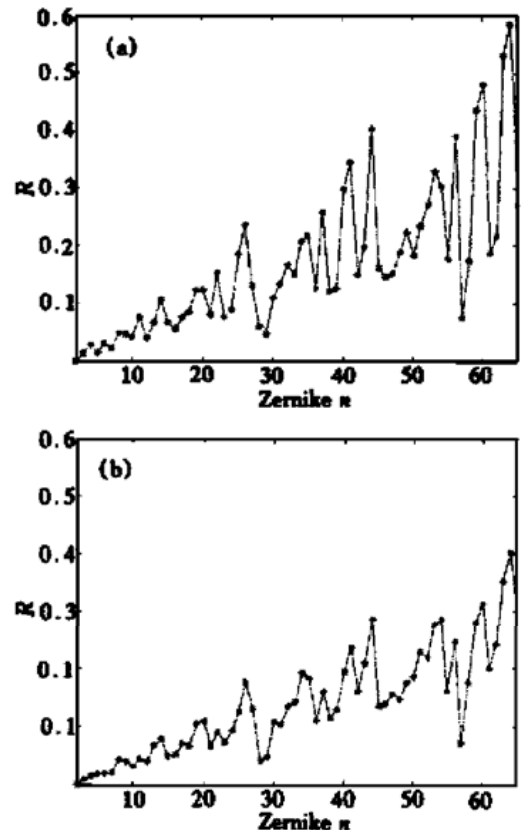


Fig. 3 Fidelity comparison of retroreflector arrays forming pseudophase conjugated wavefront (a) Array with hexagon underside retroreflectors; (b) Array with square underside retroreflectors

3 角反射器阵列与哈特曼-夏克波前传感器的匹配

哈特曼-夏克传感器是利用微透镜阵列将被测波前细分为许多子波前,每一子波前可视为平面波,经微透镜会聚于 CCD 探测面上,便可从光斑质心的位置计算出子波前的平均斜率,然后进行波前复原。如果用哈特曼-夏克传感器探测厩相位共轭波,则所得信号并不是在任何条件下都与理想相位共轭波相同,只能在特定的匹配条件下,才能与理想相位共轭波的探测结果相同。角反射器阵列与微透镜阵列的单元数目、形状、位置的对应关系决定了哈特曼-夏克传感器所得信号是否与理想相位共轭波相同,是否能利用之进行相位共轭波的波前复原,我们对不同情况分别进行讨论。

3.1 角反射器阵列单元与哈特曼-夏克传感器微透镜阵列子孔径数目相同

角反射器阵列单元与哈特曼-夏克传感器微透镜阵列子孔径一一对应。每一个角反射器所反射的光波在相应微透镜的焦面上被接收。当被测波前是理想相位共轭波时,由傅里叶光学可知,接收面上的光强分布 $I_1(\xi, \eta) \propto |\mathcal{A}E_1^*(x, y)|^2$, 当被测波前是厩相位共轭波时,由(1)式,接收面上的光强分布 $I_2(\xi, \eta) \propto |\mathcal{A}E_1(-x, -y)|^2$, 由傅里叶变换的性质知, $I_1(\xi, \eta) = I_2(\xi, \eta)$ 。此时,厩相位共轭波和相位共轭波经微透镜阵列后,在焦面上形成的各光斑光强分布完全相同,光斑质心位置一定也相同,则计算出的子波前斜率也相同。因此从原理上讲,对于任何像差,角反射器阵列单元与哈特曼-夏克传感器微透镜阵列子孔径一一对应时,角反射器阵列的使用不会给波前探测带来更多的误差。

3.2 角反射器阵列单元数目大于哈特曼-夏克传感器的子孔径数目

当被测波前是理想相位共轭波时,接收面上的光强分布 $I_1(\xi, \eta) \propto |\mathcal{A}E_1^*(x, y)|^2$ 。

当被测波前是厩相位共轭波时,角反射器阵列单元数目与哈特曼-夏克传感器的子孔径数目的关系是 $n : 1$, 接收面上的光强分布 $I_2(\xi, \eta) \propto |\mathcal{A}E_2(x, y)|^2$, 由(2)式, $I_2(\xi, \eta) \propto |\mathcal{A}E_1^*(x, y) \circledast \mathcal{A}P(x, y)|^2$, (4) 其中 \circledast 表示卷积, 则 $I_1(\xi, \eta)$ 、 $I_2(\xi, \eta)$ 的不同由 $\mathcal{A}P(x, y)$ 引起。

$$\mathcal{A}P(x, y) = \sum_{i=1}^n \exp\{j[2\phi_0(x_0^i, y_0^i)]\} \times \exp[-j(k_x x_0^i + k_y y_0^i)] T(k_x, k_y), \quad (5)$$

其中 $T(k_x, k_y) = \mathcal{A}t(x, y)$ 。

由(4)式可知, $I_2(\xi, \eta)$ 是由 $\mathcal{A}E_1^*(x, y)$ 、 $\mathcal{A}P(x, y)$ 作卷积的结果,若 $\mathcal{A}E_1^*(x, y)$ 的非零区域为 τ_1 , $\mathcal{A}P(x, y)$ 的非零区域为 τ_2 , $I_2(\xi, \eta)$ 的非零区域为 $\tau_1 + \tau_2$, 因此哈特曼-夏克传感器中 CCD 所探测到每个子孔径的厩相位共轭波的光斑较理想相位共轭波一定有所弥散,从 $P(x, y)$ 可知每个子孔径上光斑的弥散情况不仅与所对应的角反射器的数目和结构有关,而且和像差本身的性质有关。计算仿真结果如图 4 和表 1 所示,其中假设哈特曼-夏克传感器的每一微透镜的孔径为方形,角反射器阵列的单元孔径函数 $t(x, y)$ 也为方形的情形,入射光波的像差为任取的倾斜和二次像差之和。

可见, $n > 1$ 时, $I_2(\xi, \eta)$ 由一系列的光斑阵列构成,但其光强分布的主趋势还是与 $n = 1$ 时 $I_1(\xi, \eta)$ 的光强分布是一致的,显然有所弥散,计算出的光斑质心位置也有较大差异,如表 1 所示。

Table 1. Unitary centroid position when number of retroreflector and microlens is $N : 1$

N	x	y
1 × 1	0.1396	0.1365
2 × 2	0.1473	0.1455
5 × 5	0.1493	0.1515
10 × 10	0.1521	0.1526
20 × 20	0.1542	0.1580

因此,角反射器阵列单元数目大于哈特曼-夏克传感器的子孔径数目时,引起的光斑质心误差较大,实际应用中以角反射器阵列单元与哈特曼-夏克传感器微透镜阵列子孔径一一对应最好。

3.3 角反射器阵列与哈特曼-夏克波前传感器的单元位置的对应

如果排列位置严格对准,每一个哈特曼-夏克传感器的微透镜能形成很好的光斑;如果排列位置有一定的偏移量 d (图 5, 对应到 CCD 光敏面位置,以像素为单位),每一个微透镜所形成的光斑都会因探测到非对应角反射器反射的波前而产生误差。我们计算了该误差,首先仿真了角反射器阵列所形成的厩相位共轭波,并计算经微透镜阵列后,CCD 光敏面上的光强分布,最后得到各光斑质心位置,分比较严格对准和有偏移两种情况得到误差的大小。这里

我们用光斑阵列所有光斑质心偏差的均方根值作为判据(以像素为单位),如图 6 所示,该误差因像差的

不同而不同,相对而言对准偏移量越大,引入的光斑质心探测误差越大。

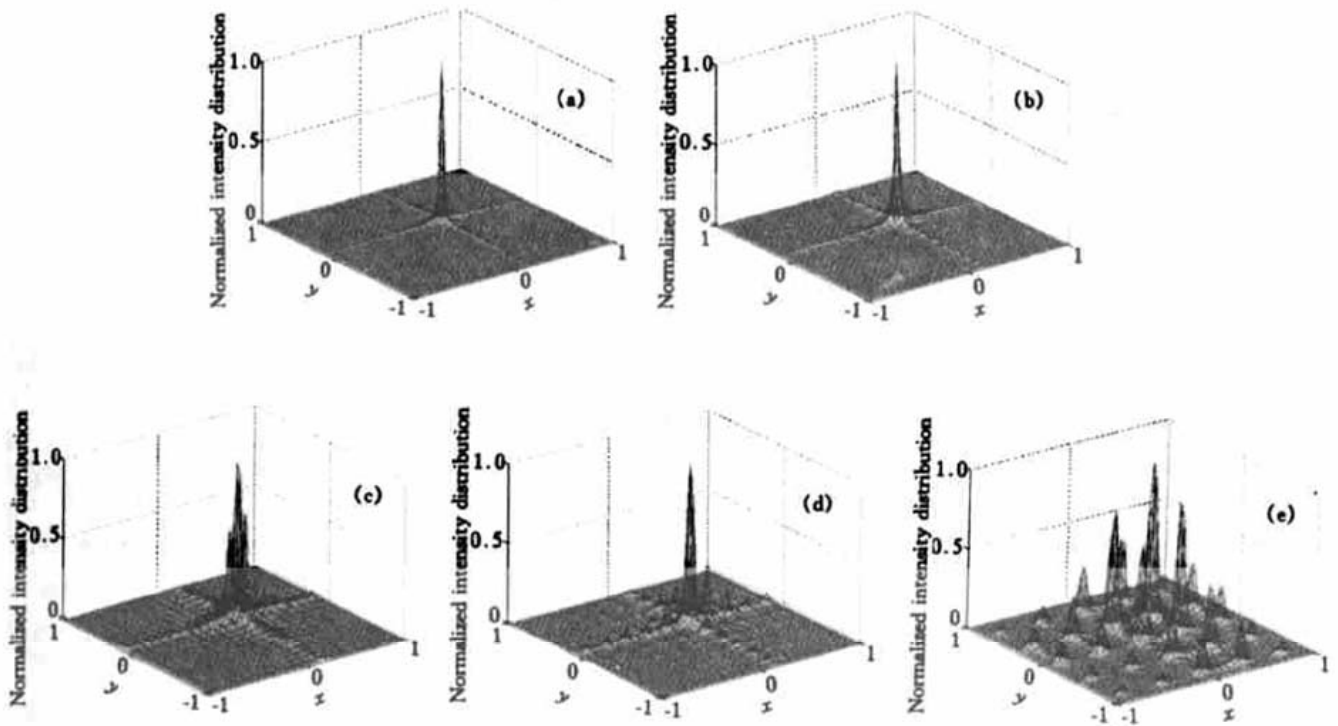


Fig. 4 The intensity distribution in the subaperture of wavefront sensor when the cell number of retroreflector array is N in each subaperture Hartmann-Shack wavefront sensor (x and y are both normalized). (a) $N = 1 \times 1$; (b) $N = 2 \times 2$; (c) $N = 5 \times 5$; (d) $N = 20 \times 20$

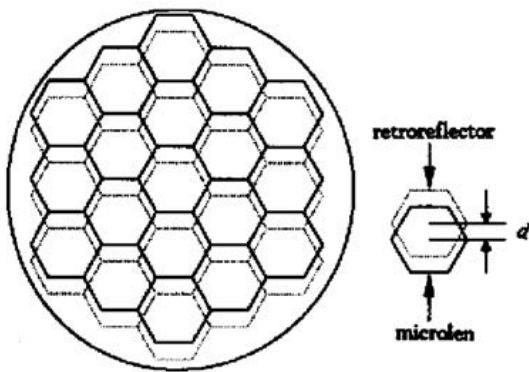


Fig. 5 The position deviation between microlens in Hartmann-Shack wavefront sensor and retroreflector array

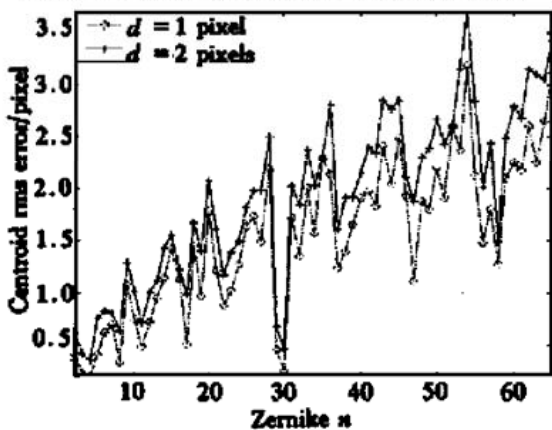


Fig. 6 The root mean square (rms) error of focal centroids versus Zernike order s of aberration, which caused by position deviation between microlens and retroreflectors

结论 以上我们得出角反射器阵列单元数越多,即单元尺寸越小,厯相位共轭波越接近理想相位共轭波的结论,但若考虑衍射效应,随着单元尺寸变小,衍射效应变得显著起来。因此利用角反射器阵列作为厯相位共轭器件时,应使每一单元的非涅耳数 $N_F \gg 1$,以至于可忽略衍射效应;其次角反射器的二面角误差、面形精度等都会对出射波的保真度产生影响,在设计与制造时应给予足够重视。总之,利用角反射器阵列作为厯相位共轭器件,需要其对相位共轭波有较好的保真度,角反射器阵列的保真度决定于其单元数、阵列结构、制造误差等等,相同的角反射器阵列对不同的像差有不同的保真度。

在自适应光学系统中,角反射器阵列作为厯相位共轭器件,与哈特曼-夏克传感器必须在单元数目、形状、排布严格匹配,且单元位置对齐,其探测结果才能作为相位共轭波的信息使用。

在自适应光学系统中,哈特曼-夏克传感器子孔径数目需满足入射波前在每一单元上可近似为平面波,而角反射器阵列与哈特曼-夏克传感器严格匹配后,则自动满足了角反射器阵列形成厯相位共轭波的要求。

参 考 文 献

- [1] Barrett H H, Jacobs S F. Retroreflective arrays as approximate phase conjugators. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(6): 190~ 192
- [2] Jacobs S F. Experiments with retrodirective arrays. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(2): 281~ 283
- [3] Chipman R A, Shamir J. Wavefront correcting properties of corner-cube arrays. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3203~ 3209
- [4] Billman K W. Airborne laser system common path/ common mode design approach. *Proc. SPIE*, 1999, **3706**: 196~ 203

Pseudophase Conjugator in Common Path/ Common Mode Adaptive Optical System

Hou Jing^{1), 2)} Jiang Wenhan¹⁾ Ling Ning¹⁾

[1), *Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*
2), *Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsa 410073*]

(Received 31 July 2000; revised 19 October 2000)

Abstract: The ability of the retroreflector array to provide pseudophase conjugate wave of the input wave is investigated and the calculated results of different Zernike polynomials aberrations are presented. The matching problems about the number and position of microlens array between retroreflector array and Hartman-Shack wavefront sensor in common path/ common mode adaptive optical system are analysed. The errors of mismatching are given.

Key words: adaptive optics; pseudophase conjugator; retro reflector array; Hartmann-Shack sensor