

文章编号: 1001-5078(2011)02-0187-05

· 光学材料器件与薄膜 ·

# 基于液晶空间光调制器的波前畸变补偿研究

李祥之<sup>1,2</sup>, 韩诚山<sup>2</sup>, 文 明<sup>2</sup>, 孙兆伟<sup>1</sup>, 赵庆磊<sup>2</sup>, 姜肖楠<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080 2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 针对液晶空间光调制器控制单元数多, 直接进行波前相位畸变补偿时计算量大的问题, 将控制输入与描述波前畸变的 Zemke 多项式系数形成映射, 极大地减小了优化维数, 有效地提高了计算效率。引入单纯形算法, 通过使设计的性能指标达到最优, 得到最佳的 Zemke 多项式, 实现了精确的波前畸变补偿。针对传统的单纯形算法易收敛于局部极点, 无法实现全局最优的特点, 对单纯形算法进行了改进, 仿真结果表明, 改进后的算法可以通过强制初始化达到全局最优, 同时分析了各种改进算法的特点, 为实际应用提供了依据。

**关键词:** 自适应光学; 波前畸变补偿; 改进型单纯形算法; 液晶空间光调制器

**中图分类号:** TN929.12 **文献标识码:** A

## Research on wavefront distortion compensation based on liquid crystal space light modulator

LI Xiang-zhi<sup>1,2</sup>, HAN Cheng-shan<sup>2</sup>, WEN Ming<sup>2</sup>, SUN Zhao-wei<sup>1</sup>, ZHAO Qing-lei<sup>2</sup>, JIANG Xiao-nan<sup>2</sup>

(1. Research Center of Satellite Technology Harbin Institute of Technology Harbin 150080, China

2 Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun 130033, China)

**Abstract** The simplex algorithm is introduced and the control inputs form mapping with Zemke polynomial coefficients because the amount of calculation is large when liquid crystal space light modulator directly compensate wavefront phase distortion. The performance metric is optimized and the excellent Zemke polynomial is obtained which can realize precise compensation for wavefront distortion. The simplex algorithm is modified because the traditional simplex algorithm easily converges to the local minimums and the global optimization can not be achieved. The simulation results show that the modified simplex methods can force initialization to achieve the global optimization and the analyses to the characteristics of modification provide basis for practical application.

**Key words** adaptive optics; wavefront distortion compensation; modified simplex algorithm; LCSIM

### 1 引言

大气湍流造成的传输光束动态波前畸变是个困扰了光学界几百年的难题<sup>[1]</sup>, 自适应光学技术被认为是目前最有效, 也是最具有实用前景的补偿方法<sup>[2]</sup>。变形反射镜校正单元数较少, 通常为数十个到上百个, 生产成本较高, 应用范围受到一定的限制。液晶空间光调制器是新型的波前相位畸变校正器, 以其上万个的控制单元、较小的体积和质量、低功耗和低廉的加工成本等优点正逐渐成为新的研究热点<sup>[3]</sup>。本文采用液晶光调制器作为自适应波前

校正器, 利用单纯形算法迭代寻优, 得到最佳的控制输入, 同时对该算法易收敛到局部极点的问题进行了改进。

### 2 液晶空间光调制器相位调制原理

液晶空间光调制器的相位调制原理是通过改变液晶上下极板电压使液晶分子的偏转状态不同, 从

基金项目: 创新团队发展计划项目 (No. RT0520) 资助。

作者简介: 李祥之 (1982-), 男, 博士, 主要从事空间光通信扰动补偿技术研究。E-mail: lixiangzhi219@163.com

收稿日期: 2010-09-23; 修订日期: 2010-11-08

而改变液晶层等效折射率, 最终实现对通过液晶的偏振光的调制作用<sup>[4]</sup>。图 1 为液晶分子指向矢在电场控制下变化的示意图。

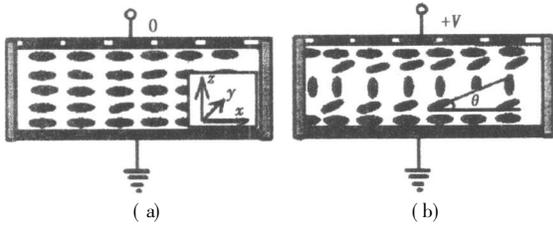


图 1 不加电场和加电场对液晶分子指向的影响

Fig 1 LC director changes without and with external field

对于单轴液晶分子, 当光波经过液晶分子传播时, 设沿着液晶分子长轴方向具有非寻常折射率  $n_o$ , 垂直分子长轴方向具有寻常折射率  $n_e$ 。假设“松弛”状态(未加外电场情况下)液晶分子长轴方向都平行于基板  $x$  轴方向, 沿着  $z$  轴方向入射的线偏振光具有  $n_o$  折射率。当在  $z$  轴方向加入外电场, 靠近基板的液晶分子由于基板强锚定作用而不能偏转, 而处于基板中间的液晶分子沿着电场方向偏转。这时, 液晶分子的等效折射率  $n_{\text{eff}}$  取决于液晶分子长轴  $x$  和轴夹角  $\theta$

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

具有波长为  $\lambda$  的线偏振光通过厚度为  $d$  的液晶层后, 产生的相位差  $\phi$  可以表示成为:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} [n_{\text{eff}}(\theta) - n_o] dz \quad (2)$$

通过改变电场的分布可以控制出射光波的相位差, 实现对光波的相位调制, 这是液晶空间光调制器相位调制的基本原理<sup>[5]</sup>。

### 3 波前畸变补偿算法

#### 3.1 基于空间光调制器的波前畸变补偿方案

如图 2 所示为基于空间光调制器的波前畸变补偿方案。因为液晶空间光调制器只能调制偏振光, 所以对光源发出的激光调制前先通过偏振片, 经光调制器调相后进入分束器, 大部分光信号直接到达

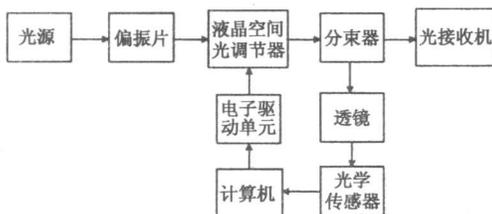


图 2 基于空间光调制器的波前畸变补偿方案

Fig 2 wavefront distortion compensation scheme of SIM

光接收机, 小部分光信号通过透镜投射到光学敏感器件上, 为控制回路提供反馈信号, 计算机根据光学传感器的反馈, 运行控制算法程序, 形成控制指令, 使设计的性能指标达到最优, 控制信号驱动电子单元, 对液晶空间光调制器形成反馈控制。

#### 3.2 Zernike 多项式

设液晶空间光调制器控制单元为  $256 \times 256$  每个控制单元对应一个控制电压, 所以需要输入控制信号  $u_i(k)$  ( $i = 1, 2, \dots, 256^2$ ), 对于如此高维数的控制问题, 在实际的处理过程中计算量相当庞大, 很难满足实时性要求。

Zernike 多项式可以用来描述波前相位畸变, 而且在波前相位展开中, 用较少项数就可以较精确的重构畸变波前<sup>[6]</sup>。本文以 9 阶 Zernike 多项式描述波前相位畸变, 如式 (3) 表示:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & z_1(3xy^2 - x^3) + z_2(x^4 - 6x^2y^2 + y^4) + \\ & z_3(x^5 - 10x^3y^2 + 5xy^4) + z_4 2xy + \\ & z_5(y^2 - x^2) + z_6(-1 + 2y^2 + 2x^2) + \\ & z_7(-2x + 3xy^2 + 3x^3) + \\ & z_8(-2y + 3x^2y + 3y^3) + \\ & z_9(1 - 6x^2 - 6y^2 + 6x^4 + 6y^4 + 12x^2y^2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $x, y$  为空间坐标;  $z_1$  为三叶项系数;  $z_2$  为四叶项系数;  $z_3$  为五叶项系数;  $z_4$  为  $\pm 45^\circ$  散光项系数;  $z_5$  为  $0^\circ$  或  $90^\circ$  散光项系数;  $z_6$  为离焦项系数;  $z_7$  为  $x$  轴彗差项系数;  $z_8$  为  $y$  轴彗差项系数;  $z_9$  为球差项系数。

将 Zernike 多项式系数代替光调制器的控制信号作为优化算法的输入, 将  $256^2$  维的优化问题转化为 9 维, 大大减少了计算量。

#### 3.3 性能指标的选取

在实验方案设计中, 光学敏感器选用高灵敏度的 CMOS 敏感器, 该敏感器分辨率为 32 bit 所以最大光强可表示为  $2^{32}$ , 像素阵列为  $640 \times 640$ , 可认为无畸变的光束主要集中在中心的  $20 \times 20$  的像素阵列上, 其他像素感应到的为背景辐射噪声、杂散光和暗电流噪声等, 而这些噪声是通过接收器前端光谱滤波器的残余扰动。当有波前畸变时, 光束能量会有一定的扩散, 中心位置的像素阵列接收到的光强就会下降, 所以在评价波前畸变补偿效果时可选用如下两个性能指标:

$$J_1 = \frac{\sum_{i=0}^{640} \sum_{j=0}^{480} I(i, j)}{\sum_{n=310}^{330} \sum_{m=250}^{270} I(n, m)} \quad (4)$$

$$J_2 = \sum_{i=0}^{640} \sum_{j=0}^{480} I(i, j) - \sum_{n=310}^{330} \sum_{m=250}^{270} I(n, m) \quad (5)$$

其中,  $I(i, j)$  为  $i$  行  $j$  列的像素接收的光强值。在无波前畸变时,  $J_1$  约为  $1.75$ ,  $J_2$  约为  $1 \times 10^9$ , 当存在畸变时,  $J_1$  和  $J_2$  都相应增加, 所以可根据  $J_1$  和  $J_2$  增加程度来判断补偿的效果。

### 3.4 单纯形算法

单纯形算法是一种  $m$  维非线性函数的无约束最优化的直接搜索方法, 该算法的  $m$  维几何图形是具有  $m+1$  个顶点的凸多面体。为了在满足  $X \in R^m$  且  $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]$  条件下, 使  $f(X)$  最小化, 需将该算法的初始条件取为单纯形的  $(m+1)$  个顶点  $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, \dots, X_{m+1}^{(1)}$ 。在该算法中定义了四个参数: 反射系数  $\rho$  ( $\rho > 0$ ), 扩展系数  $\chi$  ( $\chi > 1; \chi > \rho$ ), 压缩系数  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) 和收缩系数  $\sigma$  ( $0 < \sigma < 1$ )<sup>[7]</sup>。

在每次迭代中, 该算法按如下步骤执行:

#### (1) 排序

在每次迭代开始, 将  $(m+1)$  个顶点  $(X_1^{(k)}, X_2^{(k)}, \dots, X_{m+1}^{(k)})$  进行排序, 使其满足:

$$f_1^{(k)} \leq f_2^{(k)} \leq \dots \leq f_{m+1}^{(k)}$$

其中, 上标  $k$  表示第  $k$  次迭代。在后面分析中为表示简便, 将去掉  $k$ 。

#### (2) 反射

反射点可用下式计算:

$$X_r = \bar{X} + \rho(\bar{X} - X_{m+1}) \quad (6)$$

其中,  $\bar{X}$  表示  $m$  个最优点的中心, 可用下式表示:

$$\bar{X} = \sum_{k=1}^m X_k / m \quad (7)$$

计算  $f_r(X_r)$ , 如果  $f_1 \leq f_r \leq f_m$ , 则接受反射点, 结束此次迭代。

#### (3) 扩展

如果  $f_r < f_1$ , 则计算扩展点:

$$X_e = \bar{X} + \chi(X_r - \bar{X}) \quad (8)$$

计算  $f_e(X_e)$ , 如果  $f_e < f_r$ , 则接受扩展点, 结束此次迭代, 否则接受反射点, 结束此次迭代。

#### (4) 压缩

有两种类型的压缩方式: 外压缩和内压缩。

如果  $f_m \leq f_r \leq f_{m+1}$ , 计算外压缩点:

$$X_{oc} = \bar{X} + \gamma(X_r - \bar{X}) \quad (9)$$

计算  $f_{oc}(X_{oc})$ , 如果  $f_{oc} < f_r$ , 则接受外压缩点, 结束此次迭代, 否则执行收缩。

如果  $f_r \geq f_{m+1}$ , 计算内压缩点:

$$X_{ic} = \bar{X} - \gamma(\bar{X} - X_{m+1}) \quad (10)$$

计算  $f_{ic}(X_{ic})$ , 如果  $f_{ic} < f_{m+1}$ , 则接受内压缩点, 结束此次迭代, 否则执行收缩。

#### (5) 收缩

产生  $m$  个新顶点:

$$V_i = X_1 - \sigma(X_i - X_1) \quad (11)$$

其中,  $i = 2, 2, \dots, m+1$ 。

计算  $f(V_2), f(V_3), \dots, f(V_{m+1})$ , 将新的顶点及相应的函数值作为下次迭代初值。

### 3.5 改进型单纯形算法

单纯形算法是一种收敛速度快、适用面广的多变量函数寻优方法, 但它只是一种局部的搜索算法, 其收敛点不能保证是全局最优点。根据以往的经验, 当观察到随着迭代次数的增加, 性能指标趋于一个常值或在一个很小的范围内波动, 并且稳态值与没有畸变时的性能指标相差较大时, 单纯形算法收敛到局部极点。这时, 随着迭代次数的增加, 系统性能无法再提高, 为了得到最优的效果, 对标准的单纯形算法需进行必要的改进, 主要的思想是对迭代参数进行重新初始化, 下面对几种初始化方法进行分析:

#### (1) 强制初始化

该方法的原理是当单纯形算法收敛到局部极点时, 将所有的选取点重新初始化, 而初始化点的选取是随机的, 相当于重新开始进行寻优过程。

#### (2) 除最优点外其他点强制反射

当连续 10 次迭代后全是收缩迭代或是发现性能指标不再变化或变化很小时, 说明该算法正向局部极值点逼近, 应提前采取强制措施, 使其跳出此次寻优。方法是选取最后一次的最优点不变, 将其他的  $n$  个点进行强制反射, 形成新的初始化条件, 重新寻优。

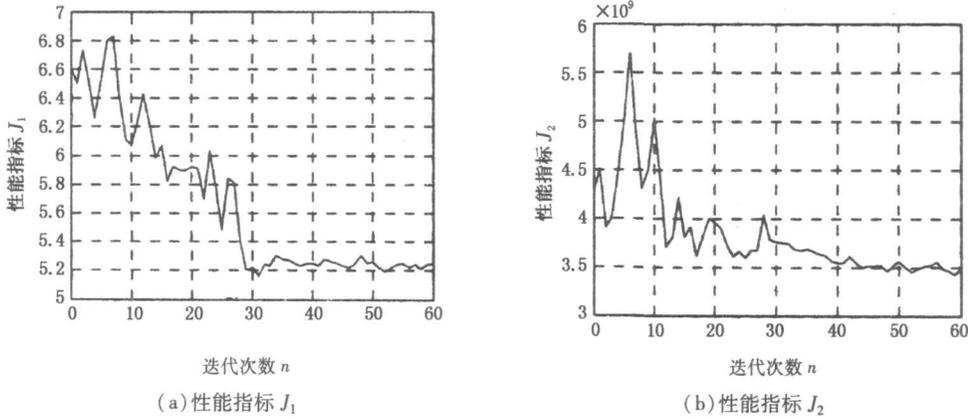
#### (3) 将多次迭代不变点强制反射

当迭代过程中, 某个点或某些点连续  $(m+3)$  次迭代都不变, 说明局部极值点存在于这些点中或在这些点附近, 所以应重新初始化, 脱离该局部范围继续寻优。此种情况初始化方法是把这些不变点强制反射, 其他点不变, 得到新的初始化条件。

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 单纯形算法仿真结果与分析

图 3 表示使用单纯形算法对波前动态畸变补偿的结果, 图 3(a) 和图 3(b) 分别表示性能指标  $J_1$  和  $J_2$  随迭代次数  $n$  的变化情况。

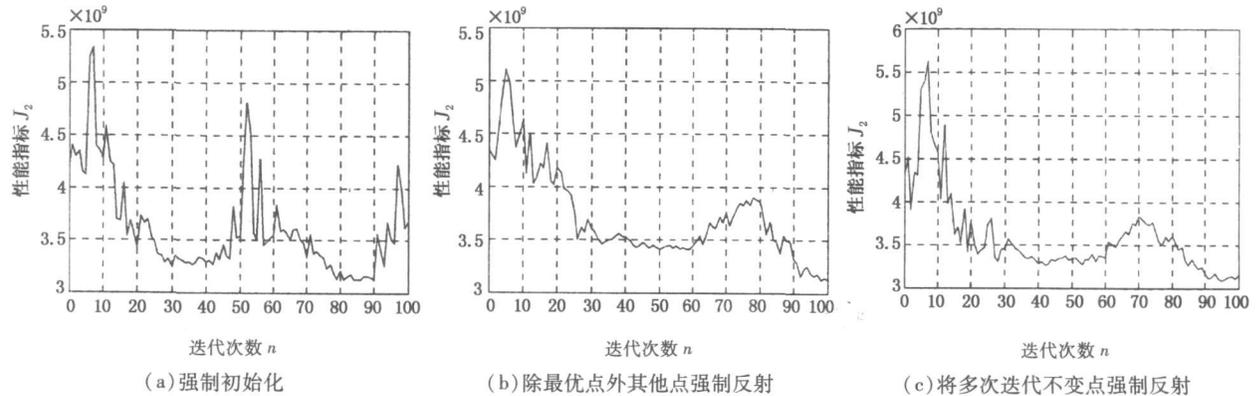
图 3 波前畸变补偿后的性能指标  $J_1$  和  $J_2$ Fig 3  $J_1$  and  $J_2$  for wavefront distortion compensation

仿真结果分析: 如图 3 所示, 在波前畸变补偿后, 性能指标  $J_1$  和  $J_2$  都随着迭代次数的增加逐渐减小, 说明敏感器中心接收的光强在增加, 同样经过 30 次迭代后基本稳定, 说明收敛到了极值点, 其值分别达到了  $5.2$  和  $3.5 \times 10^9$ , 与没有畸变的标准值相比有较大的差距, 说明此次迭代只是收敛到了一

个局部极点, 并非全局最优点。

#### 4.2 改进型单纯形算法仿真结果与分析

为验证初始化改进后, 迭代过程是否可以脱离局部极点, 继续进行寻优, 将三种改进方法分别应用于动态波前畸变补偿, 以  $J_2$  作为性能指标, 与标准的单纯形算法进行比较, 仿真结果如图 4 所示。

图 4 改进后的波前畸变补偿的性能指标  $J_2$ Fig 4  $J_2$  for modified wavefront distortion compensation

仿真结果分析: 如图 4 所示, 图 4(a) 为直接强制初始化改进, 从图中可看出算法重新初始化后顺利脱离局部极点, 重新搜索全局最优点, 该方法更新较快, 但在每次更新时, 由于随机初始化, 至少有次以上的迭代使性能指标恶化比较严重; 图 4(b) 为除最优点外其他点强制反射改进, 从图中可以看出算法也可脱离局部极值点, 重新进行寻优, 且强制初始化后不会造成太大的性能指标恶化, 但更新速度较慢; 图 4(c) 为将多次迭代不变点强制反射改进, 情况与图 4(b) 类似, 性能指标  $J_2$  的情况比图 4(b) 略好。

从以上的仿真结果中可以看出, 每种改进方法均可以使迭代过程脱离局部极点, 重新进行搜索, 达到优化的目的, 但每种改进方法又有自身的特点, 所

以在应用时要根据实际情况适当选取。

#### 5 结论

本文主要研究了利用液晶空间光调制器补偿波前相位畸变补偿的方法, 引入了单纯形算法, 以确定调制器的最佳控制输入, 同时将控制输入与 Zernike 多项式系数形成映射, 将优化维数从  $256^2$  维变为 9 维, 极大地提高了运算效率。仿真结果表明, 优化指标  $J_1$  和  $J_2$  分别达到了  $5.2$  和  $3.5 \times 10^9$ , 与理想值有一定差距, 说明该算法并不能使性能指标收敛到最优, 主要由于单纯形算法易收敛于局部极点。本文又对该算法进行了改进, 通过重新初始化可达到全局最优, 同时分析了三种改进算法的特点, 为实际应用提供了依据。

## 参考文献:

- [ 1 ] Wu Lin Ying Jiaju Geng Biao Effect to laser transmission in the atmosphere current[ J]. Laser & Infrared, 2008, 38( 10): 974- 977. ( in Chinese)  
武琳, 应家驹, 耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[ J]. 激光与红外, 2008, 38( 10): 974- 977.
- [ 2 ] DR Luke, JV Burke, R G Lyon Optical wavefront reconstruction theory and numerical methods[ J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002, 44 ( 2): 169- 224.
- [ 3 ] K Bauchert, S Serati, A Fuman Advances in liquid crystal spatial light modulators[ J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4734: 35- 43.
- [ 4 ] Jiang Baoguang, Mu Quanquan, Cao Zhaoliang et al Correction of aberration in eyes by liquid crystal spatial light modulator[ J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 17( 11): 2651- 2656 ( in Chinese)  
姜宝光, 穆全全, 曹召良, 等. 液晶空间光调制器对真人眼畸变波前的校正[ J]. 光学 精密工程, 2007, 17( 11): 2651- 2656
- [ 5 ] Liu Bohan Research of coherent light real time transformation based on liquid crystal spatial light modulator[ D]. Harbin Institute of Technology, 2007: 25- 26 ( in Chinese)  
刘伯晗. 基于液晶空间光调制器的相干光波前实时变换的研究[ D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 25- 26
- [ 6 ] Qi Ba Chen Hongbin, Liu Shunfa Regression analysis of wavefront fitting using zernike polynomial[ J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15( 3): 396- 400 ( in Chinese)  
亓波, 陈洪斌, 刘顺发. Zernike多项式波面拟合的回归分析方法[ J]. 光学 精密工程, 2007, 15( 3): 396- 400
- [ 7 ] Li Chunfeng, Xu Chengquan, Pu wenli Improved simplex method for non linear least squares estimation[ J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29( 6): 14- 16 ( in Chinese)  
李春风, 许承权, 蒲文利. 改进的单纯形法及其在非线形参数估计中的应用[ J]. 海洋测绘, 2009, 29( 6): 14- 16