

基于子孔径波面拼接的直接波前解卷积效率

黄健¹, 樊志华^{2,3}, 吴建东^{2,3}, 谢长生^{2,3}

(1. 电子科技大学 航空航天学院, 四川 成都 611731; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;
3. 中国航天科技集团有限公司 红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘要:为提高气动光学效应下目标图像清晰化处理的运行效率,提出了子孔径拼接波前复原方法。分析了波面拼接下的直接波前解卷积效果,研究了波面拼接与传统泽尼克模式法在运行效率上的差异。仿真结果表明:子孔径拼接方法具有良好的波前复原能力,与泽尼克模式法相比具有更低的算法复杂度。基于子孔径波前拼接的直接波前解卷积方法可有效提高点源图像探测的斯特列比(Strel ratio),可应用于高超声速飞行器的红外寻的系统,抑制气动光学相位畸变的影响,增强目标探测、识别和跟踪性能。

关键词:气动光学效应;波前探测;波前重构;波前拼接;直接波前解卷积

中图分类号:TN 29

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.014

Efficiency of Direct Wavefront Deconvolution Based on Subaperture Wavefront Splicing

HUANG Jian¹, FAN Zhihua^{2,3}, WU Jiandong^{2,3}, XIE Changsheng^{2,3}

(1.School of Astronautics and Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, Sichuan, China; 2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;
3.Infrared Detection Technology Research and Development Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract:To improve the efficiency of target image processing under the aero-optical effect, the wavefront reconstruction method using aperture wavefront splicing is proposed. This paper analyzes the effect of direct wavefront deconvolution based on wave surface splicing, and compares the difference of operation efficiency between subaperture wavefront splicing and the Zernike model method. The simulation results show that the subaperture wavefront splicing method has the excellent wavefront recovery ability, and its algorithm complexity is much lower than that of the Zernike model method. Furthermore, the direct wavefront deconvolution based on subaperture wavefront splicing can effectively improve the Strel ratio of the point source image. Therefore, this method can be applied in the infrared seeker of the hypersonic vehicle to suppress the influence of aerodynamic optical phase distortion and to enhance the performance of target detection, recognition and tracking.

Keywords: aero-optical effect; wavefront detection; wavefront reconstruction; wavefront splicing; direct wavefront deconvolution

0 引言

超音速飞行器在稠密大气层内高速飞行时,气流对其产生的气动加热会使飞行器头部周围产生高温,造成头部激波与弹体冷却层之间、气流与外部气流之间形成强湍流边界层^[1]。当目标的红外光线通

过湍流流场时,由于混合层气体密度梯度发生变化,因此导引头光学系统将接收到畸变的目标图像,这种效应被称为气动光学效应^[2-4],是影响导引头对目标探测、识别和跟踪能力的主要因素^[5-7]。

近年来,气动光学波前畸变的自适应校正研究

收稿日期:2018-09-30;修回日期:2018-12-02

基金项目:国家自然科学基金(61405023);上海航天科技创新基金(SAST2015075)

作者简介:黄健(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为自适应光学、气动光学、湍流结构测试。

取得了一定成果^[8-11],但距离实现气动光学效应的实时校正还存在较大差距。气动光学与大气光学效应都源于光路上的流场变化,然而气动光学波前畸变的频率变化范围在 30~100 kHz,目前自适应光学系统控制带宽仅约为 1 kHz,难以对气动光学相位畸变进行实时补偿^[3, 9, 12],因此应采用图像事后处理技术进行气动光学效应校正^[13]。

模糊图像事后处理技术种类繁多,运行效果和效率有各自不同的适应性^[14]。其中较为成熟的是基于波前探测的解卷积图像复原技术,也被称为直接波前解卷积(DWFS)。该方法利用波前传感器探测到的畸变波前信息对降质图像进行解卷积处理,将波前信息作为先验知识,充分利用当前电子系统处理速度快的优势,在提高图像处理效果与运算效率方面取得了良好的联合效果。相对于昂贵、复杂的自适应光学系统,DWFS 硬件系统功耗低、体积小、成本低,这些优势使 DWFS 方法更适宜在机载或弹载条件下应用^[15]。

本文提出了一种子孔径波面拼接的波前复原方法,分析了波面拼接下的直接波前解卷积效果,同时对波面拼接与传统泽尼克模式法在运行效率上的差异进行了比较分析。

1 子孔径波面拼接方法

在传统的自适应光学领域,通常采用模式法来重构波前^[16],即用 1 组泽尼克多项式来描述波前 $\Phi(x, y)$, 其表达式为

$$\Phi(x, y) = a_0 + \sum_{K=1}^n a_K Z_K(x, y) + \epsilon \quad (1)$$

式中: a_0 为平均波前相位; a_K 为第 K 项泽尼克多项式系数; $Z_K(x, y)$ 为第 K 项泽尼克多项式; ϵ 为波前相位测量误差。通过斜率测量出波前误差的各个模式系数后,就可得到整个波前的表达式。哈特

曼波前探测器子孔径上的斜率数据与泽尼克多项式系数的关系可表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}\mathbf{A} + \epsilon \quad (2)$$

式中: \mathbf{G} 表示子孔径斜率向量; \mathbf{D} 为系统结构确定的常数矩阵; \mathbf{A} 为波前泽尼克系数。在最小范数和最小二乘意义下可求得波前对应的泽尼克系数的解,即

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}^+ \mathbf{G} \quad (3)$$

式中:“+”表示矩阵求逆; \mathbf{D}^+ 为波前复原矩阵。通过泽尼克系数可用式(1)求出待测的波前相位。

模式法复原的优点是复原精度高,对像差拟合能力强;缺点是包含了大量的乘法运算,计算量大。采用子孔径直接拼接的方法,可构造出一种具有更小乘法运算量和总运算量的波前重构算法,其基本过程主要有两步:一是根据子孔径斜率构建该子孔径区域上的等效斜面;二是根据孔径的相对位置,将相邻斜面拼接在一起。由于第一步中仅通过斜率数据生成子孔径斜面,造成相邻孔径上相位之间的平移误差信息丢失,因此在第二步中,利用波面的连续性假设,即相邻波面接缝处的相位值应相同,拼接过程中加上接缝位置处 2 个波面的相对误差即可。

采用 3 种不同密度子孔径拼接 1 个均方根值为 0.357λ 的离焦波面,仿真过程如图 1 所示。图 1 (a), (b), (c) 对应的拼接波面的残差均方根值分别为 0.0331λ , 0.0082λ 和 0.0036λ 。随着子孔径密度的增大,波前残差进一步减小。对于离焦而言, 4×4 的子孔径分布已使得重构波前残差小于原始波前的 $1/10$, 子孔径波面拼接能捕获大部分的波前特征。

在子孔径波面拼接复原中,波面误差主要来自两部分:一是理论上待拟合波面在任意子孔径上仍为曲面,子孔径分割时可用 1 个斜平面来近似,因此产生局部拟合误差;二是相邻子孔径上的波面用

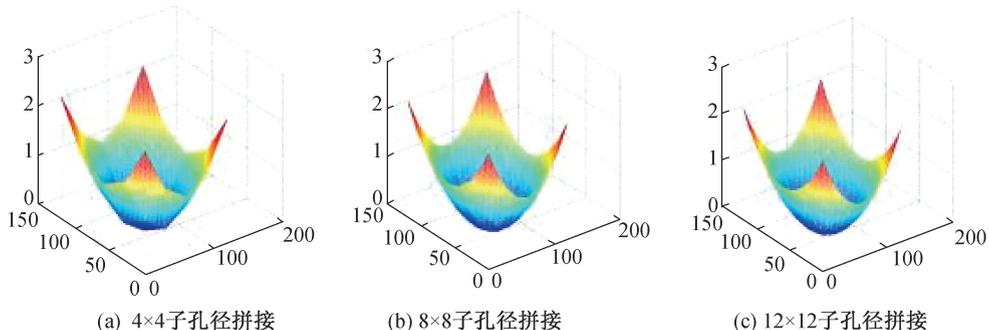


图 1 采用子孔径斜面直接拼接离焦波面

Fig. 1 Defocus wavefront spliced by planes on subapertures

斜面拟合后,由于其斜率并不完全相等,接触边线的相位值并非严格意义上相同,在拼接时采用边线均值相等的方法,这也会产生拟合误差。随着孔径密度增加,这两部分误差均同步下降,直至符合波面拟合误差需求。

在气动光学效应中,气动光学相位畸变可能含有高阶像差成分,因此对于高阶波面的拼接需要更多的子孔径,根据自适应光学波前探测的基本原理,子孔径尺度应该尽量小于波面的相干结构尺度。对于构成波面的泽尼克多项式,子孔径周期数应大于泽尼克多项式的周期数的 2~3 倍。

2 直接解卷积像清晰化效果分析

图像复原在天文观测、医学成像、遥感测量等领域被广泛应用,其主要是从观测到的降质图像中剥离出真实图像^[17]。图像的降质模型可描述为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (4)$$

式中: $g(x, y)$ 为实际观测值; $f(x, y)$ 为真实图像; $h(x, y)$ 为系统或环境造成的降晰函数; $n(x, y)$ 为噪声; “*” 为空域循环卷积。由于空域的卷积等价于频域上的相乘,因此

$$G(f_x, f_y) = H(f_x, f_y) \cdot F(f_x, f_y) + N(f_x, f_y) \quad (5)$$

式中: $G(f_x, f_y), H(f_x, f_y), F(f_x, f_y), N(f_x, f_y)$ 分别为式(4)中对应变量的傅里叶变换。

图像复原问题从物理上讲是一个在噪声影响下的解卷积问题,在光学与成像系统中,点扩散函数(PSF)可用来代替 $h(x, y)$,其可利用傅里叶变换通过光学系统的畸变波前直接计算获得。确定了 PSF 就可使用其逆函数与实际观测到图像进行卷积,从而将真实图像复原出来。这种依赖于波前信息的解卷积方法即为 DWFS。

针对 1 个包含第 101 阶泽尼克多项式的复合像差,对其进行子孔径波面拼接,利用拼接波面计算其点扩散函数和解卷积的效果。其中,第 101 阶泽尼克多项式的角向频率数为 12,因此采用 24×24 的子孔径分布进行波前探测和波面拼接。包含高阶像差的波面拼接与解卷积效果如图 2 所示。由图可见:当子孔径采样密度满足采样要求时,其拼接波面与原始波面高度相似,并且两者点扩散函数的形态也基本相同,直接解卷积会获得 1 个接近艾里斑的单峰亮斑,这表明利用子孔径波面拼接方法可实现良好的直接波前解卷积效果。拼接波面复原误差使得其点扩散函数并不完全与原始波面的点扩散函数一致,因此解卷积后的光斑也并不是严格意义上的艾里斑,在图 2(e)中看不到二阶亮环。

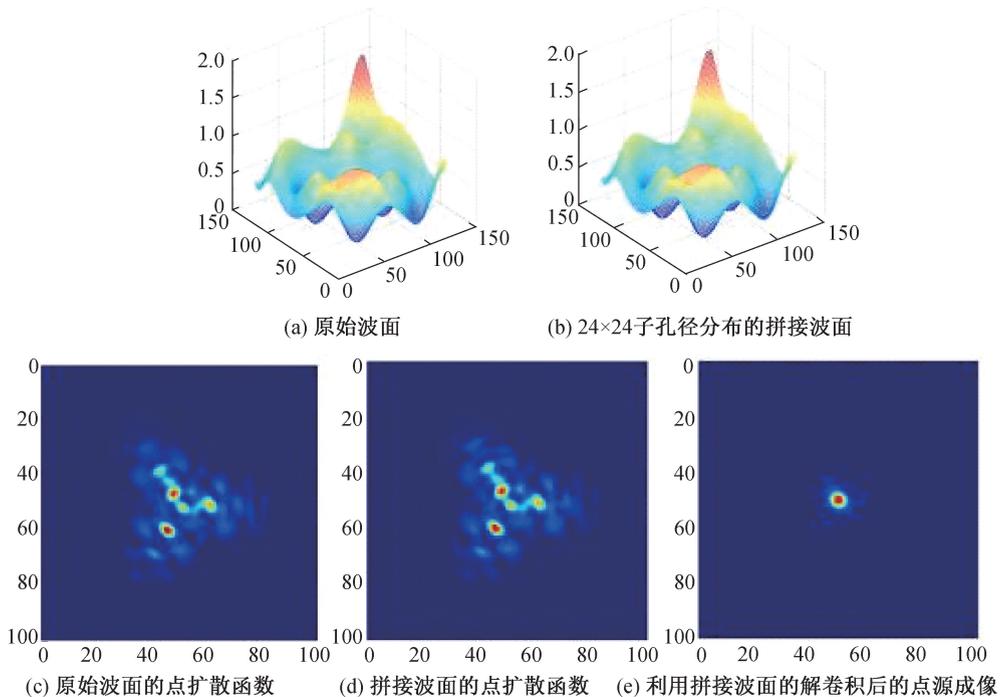


图 2 包含高阶像差的子孔径波面拼接与解卷积效果

Fig. 2 Wavefront splicing for high order aberrations and corresponding effect of direct wavefront deconvolution

解卷积效果不但与波前的空间频率结构有关,而且与畸变波前的幅值有关。含有高阶像差的直接波前解卷积效果如图3所示。由图可见,直接波前解卷积对相对较大的波前像差的效果比较明显。

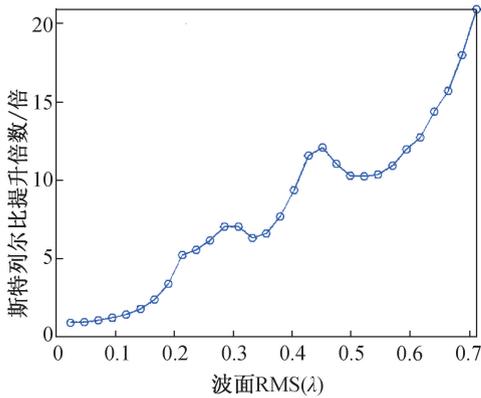


图3 含有高阶像差的直接波前解卷积效果

Fig. 3 Effect of direct wavefront deconvolution including high order aberrations

对包含101阶泽尼克多项式的高阶复合像差采用 24×24 子孔径进行波面拼接,拼接过程中保持像差形态不变,但改变像差的幅值,复原波前的均方根值(RMS)取值在 $0.02\lambda \sim 0.71\lambda$ 的范围内,然后用拼接波前进行直接解卷积。当波前RMS较大时,解卷积处理后图像的斯特列尔比可提高20倍以上;而在低像差端($\text{RMS} < 0.05\lambda$ 或斯特列尔比接近于1),解卷积不能带来任何提升,这是解卷积运算本身会引入少量误差。

气动光学效应校正要求有较好的斯特列尔比增强效果和较高的运行效率。本文中采用拼接方法构造波面,与传统模式法相比,大幅减小了运算量。

假设采用1个 $M \times M$ 像素的哈特曼波前传感器,分割为 $N \times N$ 个子孔径,可令子孔径像素数目为 $P = M/N$,则采用模式法复原波前所需的运算包括:

1) 子孔径质心计算

根据质心计算公式,子孔径单方向质心计算包含 $P \times P$ 次乘法、 $2P \times P$ 次加法和1次除法。考虑到子孔径总数为 $N \times N$,分别计算 x, y 这2个质心变量,则总的运算量包含 $2M^2$ 次乘法、 $4M^2$ 次加法和 $2N^2$ 次除法。

2) 泽尼克系数计算

假设所需重构的波前的泽尼克阶数为 K ,则式(3)中复原矩阵 D^+ 的维数为 $K \times 2N^2$,斜率向量

G 的维数为 $2N^2 \times 1$,因此求解波前的泽尼克系数的运算量包括 $2KN^2$ 次乘法和 $2KN^2$ 次加法。

3) 泽尼克模式波前复原

假设所需复原的波前像素数为 $Q \times Q$,每个泽尼克多项式都是1个 $Q \times Q$ 的矩阵,则根据式(1),所需的运算量为 KQ^2 次乘法和 KQ^2 次加法。

波面拼接算法与模式法相比,所需的运算量的主要区别在于波面重构过程,模式法中的泽尼克系数计算和波前复原被子孔径斜面生成和波面拼接过程代替,这一步所需的运算主要包括生成子孔径波面的乘法和拼接过程中相邻波面移位所需的加法。假设重构波面像素为 Q ,则子孔径斜面生成的运算量为 $2Q^2$ 次乘法和 Q^2 次加法,波面移位拼接的运算量仅包含 Q^2 次加法。

在实际波前探测系统中,子孔径数目 N 远小于相机像素分辨率 Q ,因此对于含有高阶成分的像差而言,子孔径波面拼接所需的乘法和加法运算约为模式法的 $2/K$,这极大提升了气动光学波前畸变的探测和重构效率,增强了气动光学效应校正的实时性。

3 结束语

为解决气动光学相位快速探测的问题,提出了一种能实现波面快速、高精度重构的子孔径拼接方法。当子孔径频率横向分辨率大于波面角向频率2倍时,波前重构误差RMS值小于原始波面RMS的 $1/10$ 。利用拼接波面构建点扩散函数对原始波面下的模糊图像进行直接波前解卷积处理,能极大提高图像清晰化处理成像光斑的斯特列尔比。波面拼接方法的运算量仅为传统模式法的几十分之一,能应用于气动光学效应畸变图像的快速校正处理中,增强气动光学效应校正的实时性。基于直接波前解卷积方法的气动光学效应畸变图像校正还包括大量的点扩散函数生成和解卷积运算。未来的研究中,需要深入探索点扩散函数生成和解卷积运算的快速方法,进一步提高气动光学效应畸变图像校正的整体效率。

参考文献

- [1] 朱杨柱,易仕和,陈植,等.带喷流超声速光学头罩流场气动光学畸变试验研究[J].物理学报,2013,62(8):267-274.
- [2] 韩炜,赵跃进,胡新奇,等.超高声速飞行器光学窗

- 口气动光学效应分析[J]. 光学技术, 2010, 36(4): 622-626.
- [3] AGUIRRE R, NATHMAN J, GARCIA P, et al. Turbulent refractive fluid interfaces and aero-optical wavefront distortions: experiments and computations [C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005:78-81.
- [4] AGUIRRE R, NATHMAN J, GARCIA P, et al. Imaging of turbulent refractive interfaces and optical wavefronts in aero-optics[C]//36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2005:51-55.
- [5] 费锦东. 高速导弹红外成像末制导对气动光学效应技术研究的需求[J]. 红外与激光工程, 1998, 2 (1): 42-43.
- [6] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京:中国宇航出版社, 2003.
- [7] 李桂春. 气动光学[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [8] ABADO S, GORDEYEV S, JUMPER E. Adaptive-optic system requirements to mitigate aero-optical aberrations as a function of viewing angle[J]. Optical Engineering, 2014, 53(10): 103.
- [9] 谢文科, 马浩统, 高穹, 等. 气动光学自适应校正研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 5-22.
- [10] 丁浩林, 易仕和, 吴宇阳, 等. 基于 BOS 技术的气动光学流场传输效应成像偏移校正方法研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4):206-213.
- [11] BRENNAN T, WITTICH D. Statistical analysis of airborne aero-optical laboratory optical wavefront measurements[J], Optical Engineering, 2013, 52 (7): 071416.
- [12] GAO Q, JIANG Z, YI S. Modeling the temporal evolution of an aero-optical aberration with the minimum description length principle[J]. Optic Letter, 2014, 39(11): 3126-3129.
- [13] 谢文科. 气动光学畸变波前测量及控制方法[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [14] 张天序, 洪汉玉, 张新宇. 气动光学效应校正:原理、方法与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2014.
- [15] 饶长辉, 张学军, 姜文汉. 基于哈特曼夏克波前探测的图像解卷积:室内结果[J]. 光学学报, 2002, 22 (7): 789-793.
- [16] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28 (1): 7-13.
- [17] 田雨. 波前解卷积及自适应光学图像事后处理技术研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2009.

(本文编辑:应振华)