



DOI: 10.12086/oe.2018.180077

光学系统仿真软件 Seelight 在自适应光学上的应用

孙全¹, 吕品², 宁禹^{1*}, 习锋杰¹,
刘文广¹, 许晓军¹

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²中国科学院软件研究所, 北京 100190

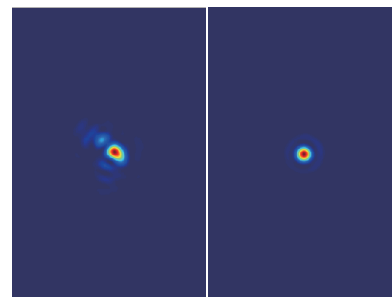
摘要: 光学系统仿真软件 Seelight 是一款可以模拟光束产生、大气传输与自适应光束控制等光学系统的具有自主知识产权的系统仿真软件, 为光学系统应用研究提供了有效的仿真工具。本文首先介绍了 Seelight 软件的基本构架、运行界面和主要模型库包含的模块, 并利用自适应光学相关的基本模型搭建了自适应光学仿真系统, 模拟了 PZT 变形镜模块和哈特曼波前传感器模块构成自适应光学仿真系统通过校正光束大气传输的波前畸变来提高远场光斑的光束质量的过程。验证了在不同的湍流强度下, 自适应光学仿真系统的校正效果随着湍流强度的增加, 校正残差大幅增加。利用 Seelight 软件可以对包含自适应光学系统的各种光学系统进行仿真建模, 并可以对系统进行有效的验证分析和优化设计。

关键词: Seelight; 自适应光学; 仿真建模; 验证分析

中图分类号: O436; O439

文献标志码: A

引用格式: 孙全, 吕品, 宁禹, 等. 光学系统仿真软件 Seelight 在自适应光学上的应用[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 180077



Application of optical system simulation software Seelight in adaptive optics

Sun Quan¹, Lv Pin², Ning Yu^{1*}, Xi Fengjie¹, Liu Wenguang¹, Xu Xiaojun¹

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Institute of Software, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

Abstract: The optical system simulation software Seelight is a system simulation software with independent intellectual property rights which can simulate beam generation, atmospheric transmission and adaptive beam control. The software provides an effective simulation tool for the application fields of optical system. In this article, we introduce the basic structure of Seelight software, the running interface, and the main modules of model libraries. Using the basic models of adaptive optics to build adaptive optics simulation systems, including the PZT deformable mirror module and the Hartmann wavefront sensor module, which improves the beam quality of the far field by correcting the wavefront aberration due to beam propagation through atmosphere. The correction effect of adaptive optics simulation system is verified under the different turbulence intensity, it is clear that correction residual greatly increased with the increasing of turbulence intensity. The Seelight software can be used to simulate various optical

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(6150527)

作者简介: 孙全(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事自适应光学和光学系统仿真的研究。E-mail: sunquan803@163.com

通信作者: 宁禹(1979-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事自适应光学和空间光学的研究。E-mail: ningyu_0205@126.com

systems including adaptive optics system, and the system can be validated and optimized.

Keywords: seelight; adaptive optics; simulation; verification and analysis

Citation: Sun Q, Lv P, Ning Y, et al. Application of optical system simulation software seelight in adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 180077

1 引言

光束的大气传输特性和自适应光学技术是现代强激光系统应用中的两个最重要技术问题。光束在介质中传输会受到介质材料折射率的分布不均而引起的折射、散射,尤其是强激光在大气中传输会受到吸收、散射和湍流、热晕等现象的影响,使光束在到达目标处时发生衰减、弥散,无法满足应用的需求;这时候就需要利用自适应光学技术对于传输引起的波前畸变进行校正,从而达到提高光束质量、补偿外大气湍流热晕、得到目标处近衍射极限光斑的效果。在实验室内开展光束大气传输和自适应光学校正实验,由于真实大气湍流的随机性,往往难以开展系统的可重复性条件下的验证工作,尤其是在实验室中很难实现长距离的大气传输环境,因此,用数值仿真的方法研究光束大气传输和自适应光学校正,是比较有效的一种方法。目前,国内外已经有很多在该领域数值仿真的研究成果发表^[1-4],大多是采用自己编写的光束大气传输和自适应校正的仿真程序。国外先进国家已经开发出若干具有实用价值的自适应光束控制仿真平台^[5-6],如 ACS、WaveProp、OSSIM、CAOS^[7]和 WaveTrain^[8]等,其中 WaveTrain 软件是过去十几年来在美国光学系统仿真项目中使用最广泛的建模和分析软件,已经成为分析大气光学传输和自适应光学系统的行业标准。而我国在光学系统仿真领域的研究起步较晚,国内还没有成熟的光学系统仿真软件被业界广泛使用。由国防

科技大学前沿交叉学科学院与中国科学院软件研究所联合开发的具有完全自主知识产权的光学系统仿真软件 Seelight 是一款模拟光束产生、大气传输与自适应光束控制的仿真平台^[9],目前已经在国内多家科研单位和高校推广使用。本文首先介绍了 Seelight 软件的基本构架、运行界面和主要模型库包含的模块,并利用自适应光学相关的基本模型搭建了自适应光学仿真系统,模拟了典型自适应光学仿真系统对光束大气传输引起的波前畸变进行校正来提高远场光斑的光束质量,还在不同的湍流强度下,验证了自适应光学仿真系统的校正残差随着湍流强度的增加大幅增加。

2 Seelight 软件概况

Seelight 软件以波动光学理论和计算机仿真学基本原理为基础,通过图形化界面以“所见即所得”的方式,实现对光学仿真系统的搭建和设计。软件由开源优化算法代码库和 C 语言函数库构成了仿真软件的基本运算库,供各物理、器件和功能模块调用,将各模块按照光学系统的结构和光路顺序通过连线方式搭建仿真系统模型,在完成对各个模块运行参数和仿真环境参数的设置之后,即可以运行仿真系统,对要模拟的光学系统进行仿真分析,仿真结束可以直接显示和存储仿真输出结果,如图像、场量、控制信号等数据,也可对输出的各种数据进行后处理和分析,软件运行界面如图 1 所示。

目前仿真系统的核心模型库,包括光源库、目标



图 1 仿真系统的图形化操作界面

Fig. 1 The graphical operation interface of the simulation system

库、探测器库、光束传输库、控制库、器件库和辅助库七个核心子库，每个子库均包含有若干个具有独立功能或代表器件的模块，如图 2 所示。这些模块功能相对独立又相互关联，构成了仿真系统最底层的原子级功能模块，多个原子级功能模块又可以组合封装成具有复杂功能的分子级功能模块，这种组织方式为软件的结构复用和功能扩充奠定了较好的基础。

3 自适应光学模块及自适应光学仿真系统

自适应光学系统一般由波前探测器、波前校正器和波前控制器三个基本部件构成。Seelight 软件具有与三个部件相关的模型，其中波前探测器有哈特曼波前探测器模块和四棱锥探测器模块；波前校正器有 PZT 变形镜模块、双压电变形镜模块和泽尼克面型分解模块；波前控制器则包括质心计算、控制运算、时间滤波和闭环反馈几个模块共同构成。

以哈特曼波前探测器和 PZT 变形镜模块为例，构成的自适应光学仿真系统如图 3 所示。图 4 和图 5 分别为哈特曼波前探测器模块和 PZT 变形镜模块的参数设置界面。

图 3 显示了所搭建的仿真系统模拟地面成像系统接收来自恒星的光束的流程，从恒星发出的光(近无穷

远处的点光源发出的光到达地球大气时可近似为平面波)穿过大气层到达地面，经过望远镜接收后在变形镜上反射后，通过分光镜后，一部分光进入哈特曼波前探测器用来测量光束经过大气时产生的波前畸变，一部分光进入 CCD 相机记录远场光斑分布；哈特曼波前探测器测量入射光波前得到的各子孔径光斑分布图，由质心算法模块计算得到各子孔径内的光斑偏移量，进而在控制运算模块中与交互矩阵作用再通过 SVD 分解法计算得到在变形镜每个 PZT 致动器上施加的调整电压，将调整电压与原电压叠加滤波后，经过负反馈模块直接施加到变形镜模块的控制电压输入端，使变形镜产生于被测波前共轭的面形，来抵消入射光束携带的波前畸变，在 CCD 的成像面上可以得到近衍射极限的远场光斑。

图 6 为按照参数设置计算得到自适应光学仿真系统的运行结果。图 6(a)为大气传输模块中采用的湍流相位屏，图 6(b)为哈特曼测量畸变波前时各子孔径的光斑分布图，图 6(c)为变形镜施加反馈控制电压得到的镜面面形，图 6(d)为开环时 CCD 得到的远场光斑，图 6(e)为闭环时 CCD 得到的远场光斑。比较仿真结果可以看出，经过自适应光学系统的波前校正，CCD 成像面的远场光斑从 2.9 倍衍射极限提高到了近 1.4 倍衍射极限。

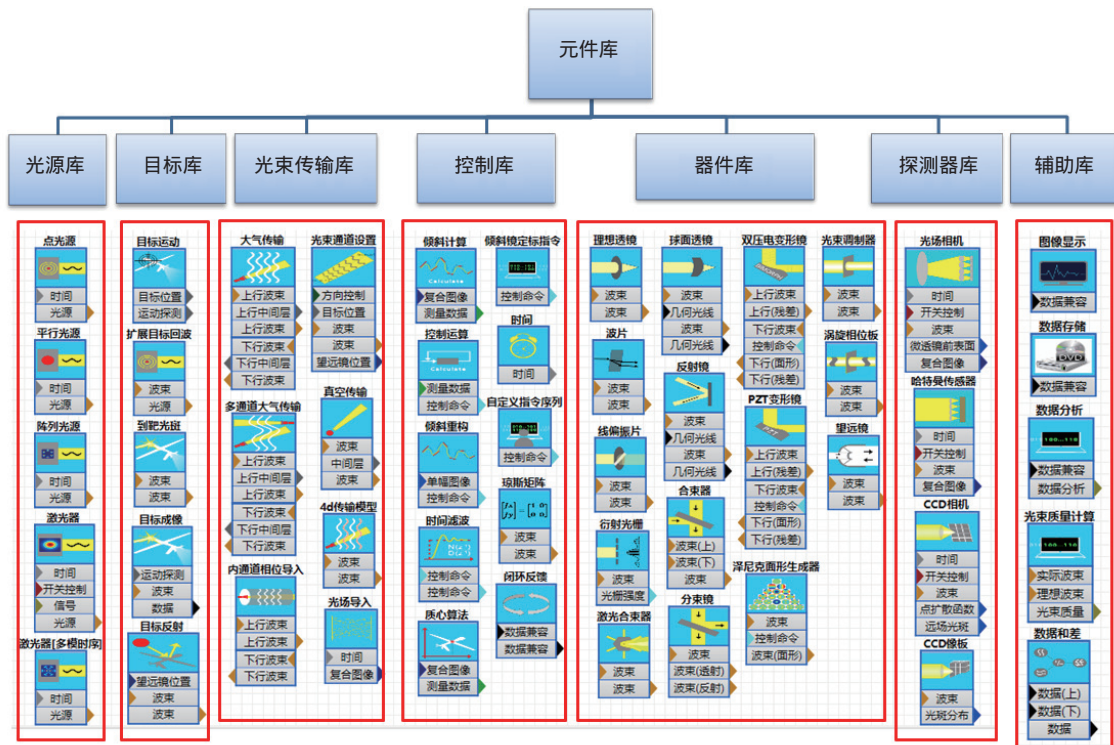


图 2 仿真系统的模型库构成

Fig. 2 The model libraries of simulation system

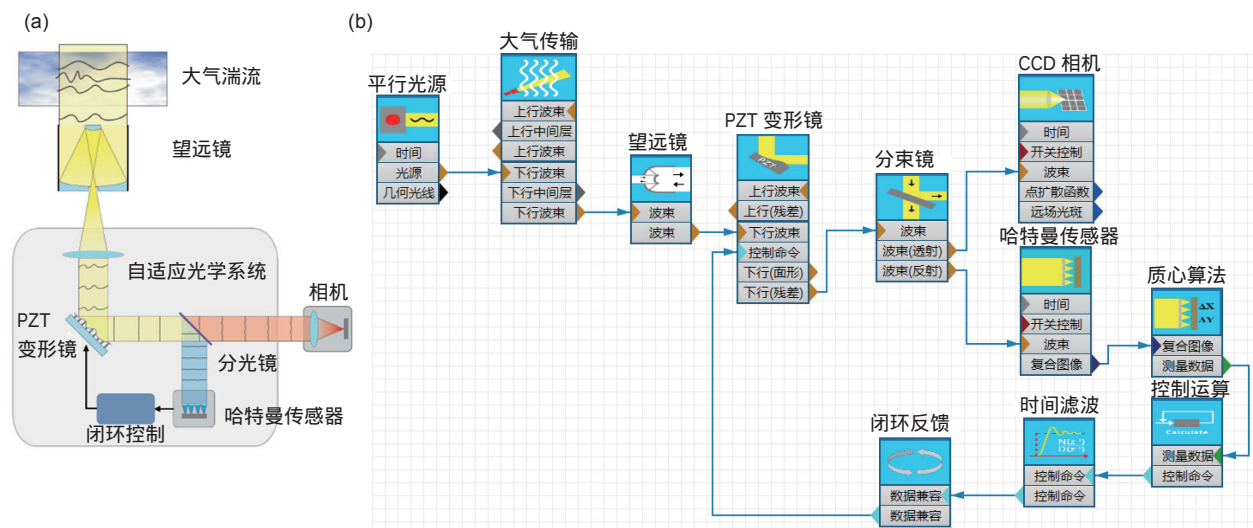


图 3 (a) 自适应光学系统原理图; (b) 自适应光学仿真系统模型示意图
Fig. 3 (a) Schematic diagram of adaptive optics; (b) Model diagram of adaptive optics simulation system

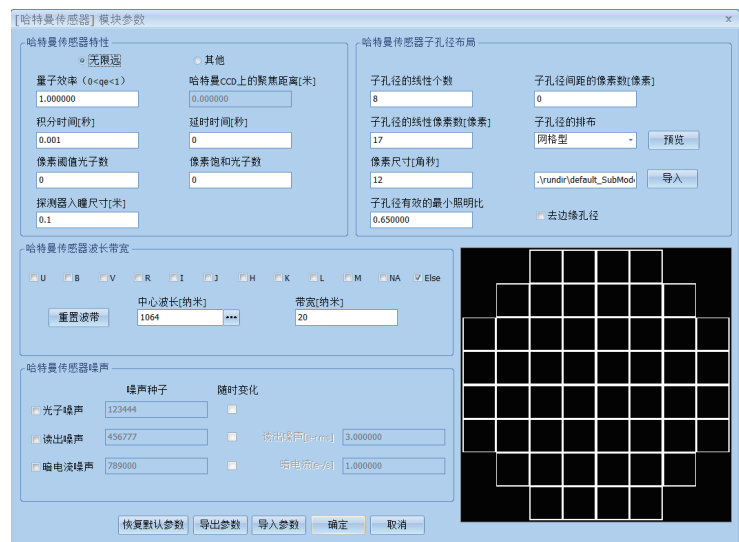


图 4 哈特曼波前探测器模块参数设置界面
Fig. 4 The parameters setting interface of Hartmann wavefront sensor



图 5 PZT 变形镜模块参数设置界面
Fig. 5 The parameters setting interface of PZT deformable mirror

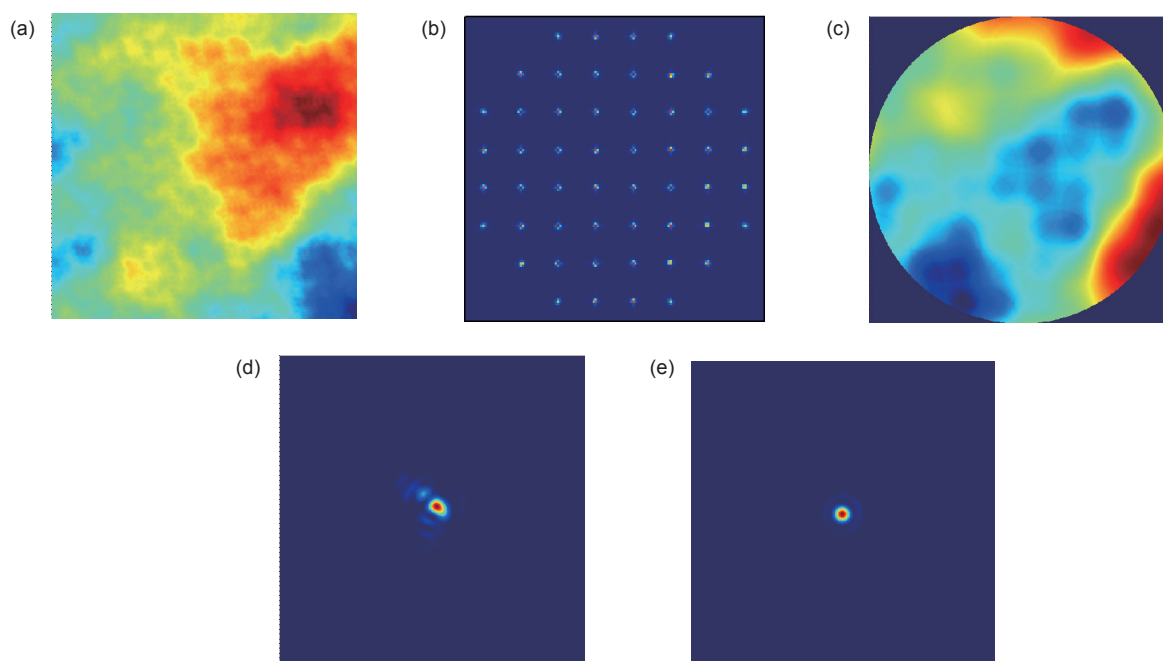


图 6 自适应光学仿真系统运行输出结果。(a) 湍流相位屏; (b) 哈特曼波前探测器子孔径光斑; (c) PZT 变形镜校正面形; (d) 开环 CCD 远场光斑; (e) 闭环 CCD 远场光斑

Fig. 6 The simulation results of adaptive optics system. (a) The turbulence phase screen; (b) The subaperture spots of Hartmann wavefront sensor; (c) The surface shape of PZT deformable mirror; (d) The farfield spot of CCD in open-loop; (e) The farfield spot of CCD in closed-loop

4 自适应光学仿真系统结果分析

利用上面搭建的自适应光学仿真系统, 1064 nm 光束在经过不同湍流条件下($r_0@1064\text{ nm}$ 为 3 cm~18 cm)大气传输后, 自适应光学仿真系统对其波前畸变校正的效果可以通过比较其校正残差来表示。仿真系统的参数设置如下: 水平传输距离为 4 km, 调整海拔

高度得到不同 r_0 值, 大气湍流包含 10 个均匀分布相位屏, 传输光束孔径为 1 m, 经过望远镜缩束为 0.1 m 的内光路口径, 变形镜和哈特曼波前传感器的口径均为 0.1 m, 其余参数如图 3、图 4 所示。仿真结果如图 7 所示, 随着湍流强度的减弱, 自适应光学仿真系统的校正残差从 41.4 nm 减小到 23.1 nm。自适应光学系统对湍流相位校正的拟合残差满足公式^[10]:

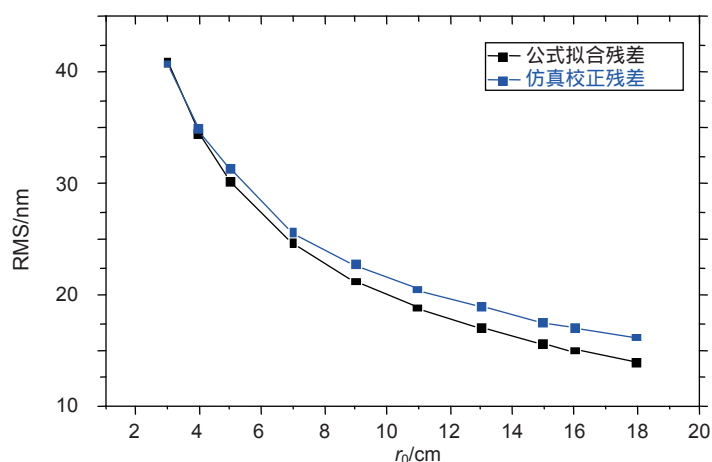


图 7 自适应光学系统校正效果随湍流强度的变化

Fig. 7 The correction residual errors of adaptive optics system change with the turbulence intensity

$$\sigma^2 = a_F \left(\frac{d}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (1)$$

其中： a_F 是变形镜常数， d 为变形镜的驱动器间隔，在变形镜致动器结构确定的情况下，校正残差与湍流强度 r_0 倒数的 $5/3$ 次方成正比。图 7 中可以看到仿真结果与公式拟合曲线的变化趋势基本一致。另外，针对仿真系统的实验室验证平台已开始搭建，将对仿真结果进行相应的实验验证。

5 结 论

本文介绍了光学系统仿真软件 Seelight 的基本软件构架、运行界面和主要模型模块，该软件可以模拟光束产生、大气传输与自适应光束控制等光学系统，利用自适应光学相关的基本模型搭建了自适应光学仿真系统，仿真结果显示自适应光学仿真系统可以明显提高远场光斑的光束质量。在不同的湍流强度下，对自适应光学仿真系统的校正效果进行了比较，仿真结果显示，随着湍流强度的增加，校正残差也随之大幅增加。利用 Seelight 软件可以对包含自适应光学系统的各种光学系统进行仿真建模，并可以对系统进行有效的验证分析和优化设计。

参考文献

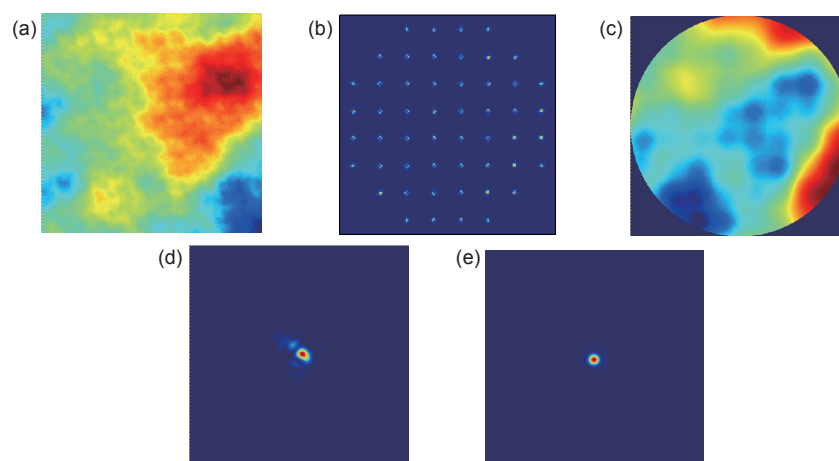
- [1] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005.
- [2] Nelson W, Palastro J P, Wu C, *et al.* Using an incoherent target return to adaptively focus through atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(6): 1301–1305.
- [3] Carbillet M, Riccardi A. Numerical modeling of atmospherically perturbed phase screens: new solutions for classical fast Fourier transform and Zernike methods[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(31): G47–G52.
- [4] Sedmak G. Implementation of fast-Fourier-transform-based simulations of extra-large atmospheric phase and scintillation screens[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(23): 4527–4538.
- [5] Le Louarn M, Clare R, Béchet C, *et al.* Simulations of adaptive optics systems for the E-ELT[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8447**: 84475D.
- [6] Carbillet M, Vérinaud C, Femenía B, *et al.* Modelling astronomical adaptive optics-I. The software package CAOS[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, **356**(4): 1263–1275.
- [7] Kanev F Y, Lukin V V, Makenova N A. Numerical simulation in adaptive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **6018**: 139–147.
- [8] Widiker J J, Miller N J, Whiteley M R. Real-time coherent phased array image synthesis and atmospheric compensation testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8395**: 839505.
- [9] 网络版 Seelight 光学系统虚拟仿真实验平台 [EB/OL]. <http://www.seelight.net/>.
- [10] Tyson P K. *Principles of Adaptive Optics*[M]. Pittsburgh: Academic Press, 1991.

Application of optical system simulation software Seelight in adaptive optics

Sun Quan¹, Lv Pin², Ning Yu^{1*}, Xi Fengjie¹, Liu Wenguang¹, Xu Xiaojun¹

¹College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Institute of Software, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China



The simulation results of adaptive optics system. (a) The turbulence phase screen; (b) The subaperture spots of Hartmann wavefront sensor; (c) The surface shape of PZT deformable mirror; (d) The farfield spot of CCD in open-loop; (e) The farfield spot of CCD in closed-loop

Overview: Beam propagation and adaptive optics are two of the most important technical problems in the application of modern high energy laser systems. Numerical simulation is an effective method for studying beam atmospheric transmission and adaptive optics correction. Many researches on numerical simulation in this field were carried out in and abroad, most of which are with the simulation programs of the beam atmospheric transmission and adaptive optics system correction. We also developed an optical system simulation software Seelight which can simulate beam generation, atmospheric transmission and adaptive beam control. The software provides an effective simulation tool for the application fields of optical system. The Seelight software is based on the basic principles of wave optics theory and computer simulation, and realizes the construction and design of optical simulation system by means of the graphical interface, which is "what you see is what you get". The software has seven core model libraries, including the source library, the target library, the detector library, the beam propagation library, the control library, the optics device library and the auxiliary library. Each sub-library contains several main modules with independent functions or representative devices. Using the PZT deformation mirror module and the Hartmann wavefront sensor module to build basic adaptive optics simulation systems, which was used to correct the wavefront aberration due to beam propagation through atmosphere. The linear number of the actuators of PZT deformable mirror is 9 and the linear number of the subapertures of Hartmann wavefront sensor is 8. With the adaptive optics system closed-loop control, the beam quality of the far field calculated by CCD camera was improved from 2.9 to 1.4 times of the diffraction limit. A simulation system was built with a 4 km horizontal atmospheric propagation path which included an adaptive optics system. The parameters of the adaptive optics system were exactly the same as those shown in the previous illustration. The correction effect of adaptive optics simulation system was verified under different turbulence intensities which were represented by r_0 values from 3 cm to 18 cm @1064 nm wavelength, and it was clear that correction residual errors greatly increased with the increasing of turbulence intensity. The simulation results showed consistent with the trend of the fitting curve according to the theoretical formula in the reference. The Seelight software can be used to simulate various optical systems including adaptive optics system, and the system can be validated and optimized.

Citation: Sun Q, Lv P, Ning Y, *et al.* Application of optical system simulation software seelight in adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 180077

Supported by National Natural Science Foundation of China (6150527)

* E-mail: ningyu_0205@126.com