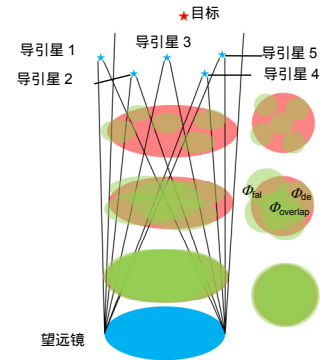




DOI: 10.12086/oe.2020.190515

## 地面层自适应光学系统多颗激光导引星位置优化研究

李彩凤<sup>1</sup>, 贾鹏<sup>1,2,3\*</sup>, 蔡冬梅<sup>1</sup><sup>1</sup> 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;<sup>2</sup> 新型传感器与智能控制教育部(山西省)重点实验室, 山西 太原 030024;<sup>3</sup> 杜伦大学高等仪器研究中心, 英国 杜伦 DH1 3LE

**摘要:** 对地面层自适应光学系统而言, 多采用呈正多边形排列的多颗激光导引星座作为参考来测量大气湍流对系统的影响。针对多颗激光导引星应当如何排布的问题, 本文采用简化的地面层自适应光学几何模型作为系统性能评价函数, 通过遗传算法优化获得不同湍流廓线下导引星的最优分布。同时, 采用多进程、Numba库和多线程提高海量大气湍流廓线下对整个系统性能的估计速度。利用上述方法, 以一个视场为 $14'$ 的地面层自适应光学系统为例, 用实测的大气湍流廓线数据分析了不同天文观测台址下湍流廓线与最优位置分布的关系。研究结果表明, 同一台址下不同数目导引星的最优位置分布差异不大, 其统计最优位置均呈中心一颗或角半径接近视场边缘的正多边形分布; 不同台址下的导引星最优位置分布差异明显; 大气湍流廓线测量的空间分辨率直接影响系统性能评价结果: 其测量结果中的等效层数越多, 导引星位置分布越接近规则的多边形。

**关键词:** 激光导引星; 大气湍流; 遗传算法; 位置优化; 算法加速

**中图分类号:** TN249; P111.2

**文献标志码:** A

**引用格式:** 李彩凤, 贾鹏, 蔡冬梅. 地面层自适应光学系统多颗激光导引星位置优化研究[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190515

## Optimizing the location of multiple laser guide stars in ground layer adaptive optical systems

Li Caifeng<sup>1</sup>, Jia Peng<sup>1,2,3\*</sup>, Cai Dongmei<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control Systems, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030024, China;<sup>3</sup>Center for Advanced Instrumentation, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

**Abstract:** At present, the ground layer adaptive optical systems are using multiple laser guide stars arranged in regular polygons as reference targets to measure the effects of atmospheric turbulence. Obtaining the optimal position of laser guide stars becomes an interesting problem to analyze. This paper proposes a method to obtain the

收稿日期: 2019-09-02; 收到修改稿日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11503018, U1631133); 山西省基础研究青年面上项目(201901D211081); 山西省重点研发项目(201903D121161); 山西省高等学校教育科技创新基金(2019L0225)

作者简介: 李彩凤(1991-), 女, 硕士, 主要从事地面层自适应光学方面的研究。E-mail: 987278301@qq.com

通信作者: 贾鹏(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事天文学和自适应光学方面的研究。E-mail: robinmartin20@gmail.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

optimal position of laser guide stars by using a genetic algorithm as the optimization algorithm and a simplified geometry model of the ground layer adaptive optic system as the evaluation function. Furthermore, multi-process, Numba library, and multi-thread techniques methods are used to accelerate calculation speed. Based on these methods, real atmospheric turbulence profiles are used to analyze the relationship between the optimal position of laser guide stars with different numbers and the different atmospheric turbulence profiles from the same site, through an example of a ground layer adaptive optics system with 14 arcmin field of view. The results show that the optimal position of laser guide stars in the same site is almost the same and their statistically optimal positions are all regular polygon. Besides, we also find that the spatial resolution of turbulence profiles has strong effects to positions of laser guide stars, showing that the more equivalent layers in the measurement results, the closer the position distribution of laser guide stars is to the regular polygon.

**Keywords:** laser guiding stars; atmospheric turbulence; genetic algorithm; location optimization; algorithm to accelerate

**Citation:** Li C F, Jia P, Cai D M. Optimizing the location of multiple laser guide stars in ground layer adaptive optical systems[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190515

## 1 引言

大气湍流对光束传输的扰动,严重影响了地基望远镜的观测能力。不同台址多年实测的湍流数据表明:越接近地面,大气湍流强度越强,其对来自天体光波的扰动也越大<sup>[1]</sup>。为此,科学家提出了地面层自适应光学系统的概念(GLAO)<sup>[2]</sup>:通过多个激光导引星和波前探测器对地面层大气湍流造成的波前畸变进行测量,之后利用一个变形镜校正地面层大气湍流的影响,进而在较大的视场内适度提高地基望远镜的观测能力<sup>[3-4]</sup>。为保证有效的观测视场,地面层自适应光学系统多采用多颗激光导引星作为参考目标。考虑到激光产生与发射系统复杂且价格昂贵,多数地面层自适应光学系统仅使用 3~5 颗激光导引星<sup>[5-7]</sup>。

激光导引星的位置排布对地面层自适应光学的系统性能会有一些影响。其最优排布位置与很多参数有关,其中大气湍流强度随高度的分布函数(大气湍流强度廓线)是影响导引星位置的主要因素<sup>[8]</sup>。大气湍流是一种在空间和时间上随机变化的介质<sup>[9]</sup>,该特性使同一台址下的廓线变化具有一定随机性。随机变化的湍流廓线必然会对地面层自适应光学系统性能带来影响,因此在导引星数目有限的情况下,从统计意义上分析不同大气湍流强度廓线对应的导引星优化位置分布很有必要。当前地面层自适应光学系统中,多采用蒙特卡洛模拟法,在典型大气湍流模型下通过计算系统的性能,得到多颗激光导引星的排布方式<sup>[10-12]</sup>。由于大气湍流廓线具有随机分布的特性,分析不同实测湍流廓线下的导引星位置需要计算不同廓线对应的位置。此时,利用蒙特卡洛法需要计算大量不同的湍流

强度廓线对应的地面层自适应光学系统性能,这会耗费极多的计算资源。

因此,本文针对大量实测的大气湍流廓线数据提出了一种导引星优化方案,首先引入一个简化的地面层自适应光学系统几何模型<sup>[13]</sup>,在该模型基础上使用遗传算法作为寻找导引星位置的优化算法,并且采用多进程、Numba 库和多线程对上述两个过程进行加速处理,通过上述方法可以方便快速地分析实测湍流数据对应的导引星最优位置情况。

## 2 地面层自适应光学系统性能评估的简化几何模型

激光导引星的位置排布主要会影响地面层大气湍流的测量和重建结果,为快速估计不同导引星分布下的地面层自适应光学系统性能,本文采用一个仅考虑导引星发出的光波对地面层大气湍流采样能力的简化模型<sup>[13]</sup>。由于本模型采用了归一化的大气折射率结构常数系数,同时假设变形镜具有完美的校正能力,因此仅用于在视场确定、导引星数目确定的情况下,对导引星排布进行快速优化。模型将大气湍流等效为多层分布于不同高度的薄相位屏,如图 1 所示。其中科学目标处于无穷远,激光导引星处于有限高度。来自科学目标的光波所经历的大气湍流路径近似为柱状,而导引星的光波所经历的大气湍流路径为圆锥状。科学目标在每一层大气湍流截出一个和望远镜口径大小相同的圆形,而导引星截出一个半径随高度减小的圆形。

WF(the fraction of the wavefront)为激光导引星光

束所采样的湍流信息占科学目标光束所经历的湍流信息的百分比(为了简写方便,用 $\phi$ 表示)。如图 1 所示,多个激光导引星光波在每层的采样结果由三部分组成:位于科学目标光束路径之外的 $\phi_{\text{fal}}$ 、在科学目标光束路径上由多个导引星共同采样的 $\phi_{\text{overlap}}$ 以及在科学目标光束路径上每个导引星各自独立采样的 $\phi_{\text{de}}$ 。只有当激光导引星所采样的湍流信息与科学目标光束所经历的湍流重叠时,其测量结果才是有效的(根据这一校正结果,可以有效地提高科学目标信噪比)。定义激光导引星光束与科学目标光束重叠区域内的 $\phi$ 为 1。由于大气湍流相位分布是连续的,因此位于激光导引星光束和科学目标光束重叠区域之外的 $\phi$ 对系统校正也有一定作用,可用下式表示:

$$\Phi(d) = 1 + b \cdot \left(\frac{d}{r_0}\right)^{\frac{5}{6}}, \quad (1)$$

其中: $r_0$ 是大气相干长度, $d$ 是激光导引星在科学目标光束路径之外与路径之内最近采样点之间的距离, $b$ 是一个由相干长度 $r_0$ 和大气湍流的外尺度 $L_0$ 决定的常量。当 $d$ 大于或等于大气湍流的外尺寸 $L_0$ 时,激光导引星在科学目标光束路径上的采样几乎没有任何贡献,则设置 WF 为-1。此时,可以由给定的 $r_0$ 和 $L_0$ 计算出 $b$ 。本文将参数 $r_0$ 设为 0.1 m, $L_0$ 设为 10 m(实际使用中,可以根据具体测量参数进行修改)。

在高度为 $h$ 的大气湍流层,设该层的 WF 为 $\Phi(h)$ ,即:

$$\Phi(h) = \Phi_{\text{de}} + \Phi_{\text{fal}} - C \cdot \Phi_{\text{overlap}}, \quad (2)$$

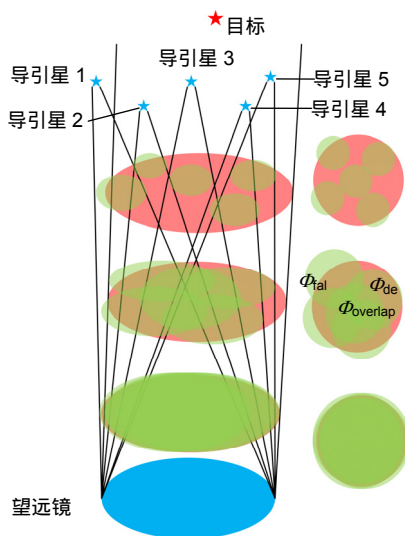


图 1 地面层自适应光学系统简化几何模型图

Fig. 1 Geometric model for ground layer adaptive optics systems

其中: $\Phi_{\text{de}}$ 、 $\Phi_{\text{fal}}$ 分别为 $N$ 个激光导引星各自在该层目标区域之内和区域之外产生的 WF 之和, $\Phi_{\text{overlap}}$ 为所有导引星在目标区域之内重叠产生的 WF 之和。 $C$ 为多颗激光导引星同时采样同一位置波面时,每颗导引星对波前测量的贡献度。本文假设多颗导引星同时采样同一个区域时,波前测量结果对于系统校正的最低贡献将减半,则将 $C$ 设为 50%。 $\Phi_{\text{de}}$ 、 $\Phi_{\text{fal}}$ 、 $\Phi_{\text{overlap}}$ 分别表示为

$$\Phi_{\text{de}} = \frac{1}{N \cdot A(h)} \sum_{n=1}^{n=N} \Phi_{\text{de}}(n, h), \quad (3)$$

$$\Phi_{\text{fal}} = \frac{1}{N \cdot A(h)} \sum_{n=1}^{n=N} \Phi_{\text{fal}}(n, h), \quad (4)$$

$$\Phi_{\text{overlap}} = \frac{1}{N \cdot A(h)} \sum_{n=1}^{n=N} \Phi_{\text{overlap}}(n, h), \quad (5)$$

其中: $N$ 为激光导引星数目, $A(h)$ 为激光导引星光束在该层投影的面积 $\pi r^2$ , $r$ 可以利用相似三角形公式快速算出。由于本文着重讨论不同廓线下的导引星位置优化,为去除不同视宁度对计算结果的影响,我们将大气折射率结构常数( $C_n^2$ )进行归一化处理。最终以 $C_n^2$ 为权重,通过加权求和计算大气湍流对系统的整体性能 $\Phi_{\text{sys}}(h)$ ,计算式:

$$\Phi_{\text{sys}}(h) = \sum_{h=h_1}^{h=h_2} \Phi(h) \cdot C_n^2(h). \quad (6)$$

最后,考虑不同视场所对应的观测区域大小不同,根据视场不同位置采样点对应的面积作为权重求和,计算出地面层自适应光学系统的整体性能,计算公式如(7)所示。

$$\Phi_{\text{all}}(h) = \frac{\sum_{n=2}^{n=N} (r_n^2 - r_{n-1}^2) \cdot \Phi_{\text{sys}}(h)}{r_N^2 \times M}, \quad (7)$$

其中: $r_n$ 代表采样点到视场中心的角距离, $M$ 为所有的采样点数目。

对一个具体的地面层自适应光学系统来说,该简化模型计算出的系统相对性能差异可以直接用来确定导引星的最优位置。

### 3 导引星位置优化算法

大气是一种连续随机介质,其湍流廓线分布与台址和气候环境息息相关。对某一处特定的台址,可以对该台址的海量湍流廓线数据进行随机抽样,结合地面层自适应光学系统模型,通过数值优化的方法获取湍流廓线和导引星最优分布之间的映射关系。

#### 3.1 大气湍流数据来源与处理

对传统地面层自适应光学系统或者多层共轭自适

应光学系统的性能进行估算，目前多采用一个统计平均的大气湍流廓线作为典型廓线，但其并不能真正反映出具体台址的特征。尤其当湍流廓线的统计分布不满足高斯分布时，统计平均值给出的结果估计和实际系统的性能差距较大。为更好地评估实际大气湍流廓线对激光导引星位置的布局影响，本文使用两组实测台址数据作为湍流廓线数据库<sup>[14-15]</sup>进行研究。如表 1 所示，一组是杜伦大学高等仪器研究中心(CFAI)用 Stereo-SCIDAR<sup>[16]</sup>方法在智利帕拉纳尔观测台址下获取的 2016 年~2018 年共 7563 条数据，该方法的高度空间分辨率较高，约为 150 m 左右，可以测量地面层湍流廓线。另一组是三十米望远镜选址团队(TMT)用 MASS 方法<sup>[17]</sup>在夏威夷莫纳克亚山观测台址下获取的 2005 年~2008 年共计 163208 条数据，该方法的高度空间分辨率比较低，一般只给出指定高度的大气湍流廓线数据，本文用到的典型高度为 0.5 km、1 km、2 km、4 km、8 km 和 16 km。

帕拉纳尔的湍流廓线数据格式如表 2 所示。根据地面层自适应光学系统简化几何模型，只需考虑随湍流高度变化的  $C_n^2$  对系统的影响。湍流廓线数据从近地面开始，每间隔 250 m 采样获取，仪器所能测量的最大高度在 25 km 左右，由此将湍流廓线定义成一个包含 100 层薄相位屏的模型，对于一些测量值不足 100 层的湍流廓线数据在高空处补零。 $C_n^2$  测量值的数量级在  $10^{-14}$  到  $10^{-19}$  之间，为计算方便，将  $C_n^2$  进行标准化：先对其取对数  $\log_{10}$ (为防止高空处部分  $C_n^2$  值为零造成的对数运算为负无穷大，可将  $C_n^2$  加 1 之后进行对数运算)，最后将结果映射到  $[0, 1]$  之间， $C_n^2$  为大小  $100 \times 1$  的矢量，标准化公式见式(8)和式(9)。由于本文关注的

是地面层自适应光学系统的相对性能变化(而非绝对校正能力)，上述变换可以减少数据差异对计算造成的不便，并不影响不同导引星排布的相对结果差异。

$$\overline{C_n^2} = \log_{10}(C_n^2 + 1) \quad (8)$$

$$\overline{C_n^2} = \frac{C_n^2 - \min(C_n^2)}{\max(C_n^2) - \min(C_n^2)} \quad (9)$$

莫纳克亚山观测台址下的湍流数据格式如表 3 所示：分别是将廓线分解为三层或六层的数据。本文采用六层大气湍流廓线数据，对应高度分别为 0.5 km、1 km、2 km、4 km、8 km、16 km， $C_n^2$  的数量级在  $10^{-14}$  到  $10^{-24}$  之间。这组数据中没有为零的  $C_n^2$ ，可直接根据式(10)进行标准化，这里  $C_n^2$  为大小  $6 \times 1$  的矢量。

$$\overline{C_n^2} = \frac{\log_{10}(C_n^2) - \min(\log_{10}(C_n^2))}{\max(\log_{10}(C_n^2)) - \min(\log_{10}(C_n^2))} \quad (10)$$

### 3.2 基于遗传算法的导引星布局优化

湍流廓线和导引星的优化分布之间的映射是一个复杂的函数，难以利用常规的凸优化方法求解。本文将将其视为一般的非线性优化问题，利用迭代思想尽可能地逼近最优解。提出采用遗传算法<sup>[18-19]</sup>获取导引星分布，主要原因是：1) 遗传算法直接对导引星位置坐标进行相关操作，其目标函数  $\Phi_{\text{all}}(h)$  可以是任意的，无需求计算  $\Phi_{\text{all}}(h)$  的过程是离散的或连续的。2) 遗传算法本身按照概率进行优化，不需要特定的条件就能自动获取和指导优化导引星位置坐标的搜索空间，可以自适应调整搜索方向。3) 导引星位置坐标在优化过程中用概率性传递规则代替确定性规则的重组变异各态历经性，能够使导引星位置坐标具有更好的全局优化解。

表 1 大气湍流数据情况

Table 1 Atmospheric turbulence data

台址	测量方法	数据量	等效层数
智利帕拉纳尔	Stereo-SCIDAR	7563	100
夏威夷莫纳克亚山	MASS	163208	6

表 2 帕拉纳尔台址下的湍流数据格式

Table 2 Turbulence data format in paranal

高度/m	大气折射率结构常 $C_n^2/\text{m}^{\wedge}(1/3)$	风速/(m/s)	风方向/(°)
0	2.247E-14	11.474	347.4
250	2.068E-14	10.345	332.9
...	...	...	...

表 3 莫纳克亚山台址下的湍流数据格式

Table 3 Turbulence data format in Mauna Kea

L	3	0.5	7.99E-14	5.9	1.47E-14	9.9	4.28E-14
X	6	0.5	6.97E-14	1.0	8.89E-22	2.0	1.09E-20
		4.0	3.49E-15	8.0	4.90E-14	16.0	6.63E-15
...							



本文针对一个口径为 10 m, 视场为 14' 的地面层自适应光学系统, 首先考虑 5 颗导引星的情况, 表 4 为地面层自适应光学系统参数。导引星位置采用极坐标  $(\rho, \theta)$  表示, 其中坐标原点为视场中心, 极径  $\rho$  为视场方向上的位置,  $\theta$  为圆周方向上的位置。 $\rho$  的取值范围为半视场角, 即  $[0'', 420'']$ ;  $\theta$  的取值范围为整个圆周角, 即  $[0^\circ, 360^\circ]$ , 则遗传算法的搜索区域为一个半径 420'' 的圆域, 具体计算流程图如图 2 所示。

表 4 地面层自适应光学系统的参数

Table 4 Parameters of the ground layer adaptive optical system

参数	数值
望远镜口径/m	10
激光导引星数目	5
激光导引星高度/km	90
视场角/(')	14
大气相干长度 $r_0$ /m	0.1
外尺度 $L_0$ /m	10

### 3.2.1 初始化种群

将导引星坐标和坐标的边界范围初始化一个  $2 \times 10$  的区域矩阵  $B$ , 第一行为坐标上界, 第二行为坐标下界, 10 列依次为坐标位置  $(x, y)$ , 具体格式:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 420 & 360 & \dots & 420 & 360 \end{bmatrix} \quad (11)$$

以  $B$  为限制条件, 按整数值编码的方式创建种群矩阵  $G$ , 其中  $N_{ind}$  代表导引星坐标组数,  $L_{ind}$  代表导引星对应的变量个数。

$$G = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & \dots & g_{1,L_{ind}} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & \dots & g_{2,L_{ind}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N_{ind},1} & g_{N_{ind},2} & \dots & g_{N_{ind},L_{ind}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)中, 矩阵的每一行代表一组导引星位置坐标, 坐标由随机的十进制整数构成, 每个坐标就是对应变量的实际值。

### 3.2.2 导引星位置数据的重组和变异

导引星位置数据的重组选择减少代理的两点交叉方式, 过程如图 3 所示, 父代双亲染色体中的基因  $[a, b, c, d, e, f, g, h, i, j]$ 、 $[A, B, C, d, e, F, G, H, I, J]$  分别对应两组导引星的坐标值, 按照 0.9 的重组概率随机选中两个交叉点, 该方式可以控制交叉点只出现在上一轮两个坐标不同的位置之间, 避免子代中产生和父代相同的坐标。

导引星位置数据的变异方式采用实值突变, 同时为了避免变异过程中使解陷入局部最优解, 变异概率不宜太大, 本文选为 0.1, 其变异示意图如图 4 所示, 图中共有三个坐标值发生了变异, 将变异后的坐标重新作为下一轮的父代坐标。

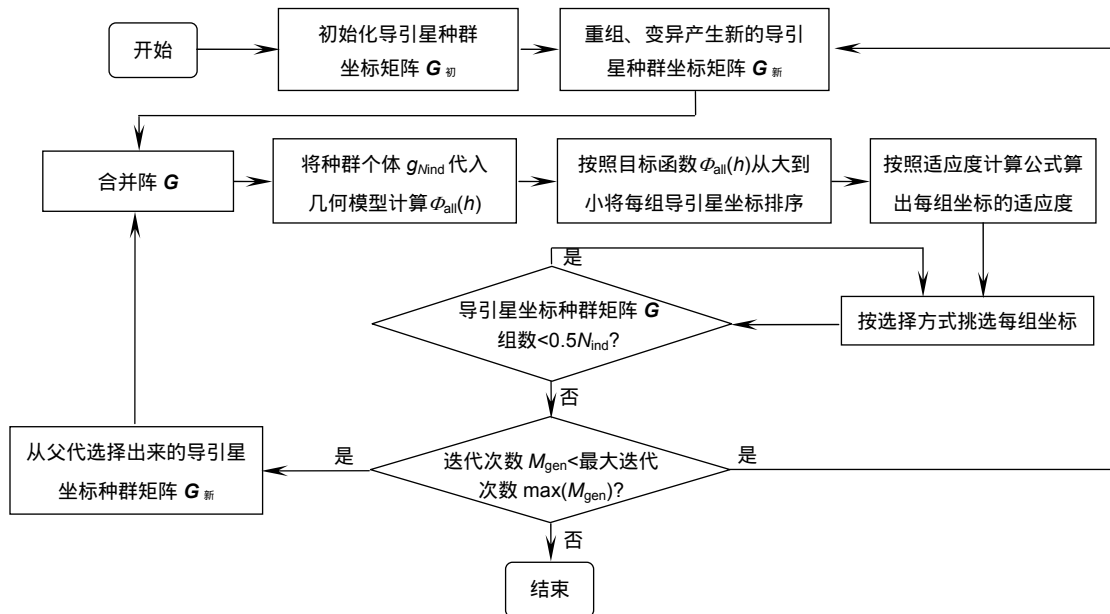


图 2 遗传算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the genetic algorithm

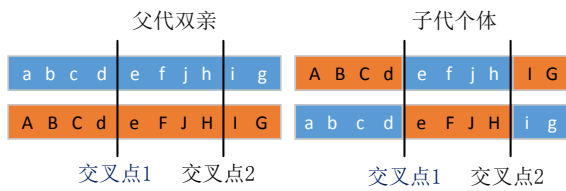


图3 遗传算法中染色体的重组过程  
Fig. 3 Chromosome recombination process in the genetic algorithm



图4 遗传算法中染色体的变异过程  
Fig. 4 Chromosome variation process in the genetic algorithm

### 3.2.3 适应度计算

本文采用等级划分的分配方式计算适应度，见式(13)。该方式根据  $\Phi_{all}(h)$  的值从大到小对导引星坐标排序，然后根据坐标在排序中的位置来确定其适应度。

$$F = 2 - P_s + 2(P_s - 1) \frac{i - 1}{N_{ind} - 1}, \quad (13)$$

式中： $P_s$  为选择压力，决定种群的收敛速度，其取值必须在  $[1, 2]$  之间，本文选为 2， $N_{ind}$  为导引星坐标的组数， $i$  为每组坐标在种群中的位置。

### 3.2.4 导引星位置数据的选择

进化中的导引星位置用锦标赛式的方法进行选择，该方法模仿淘汰赛制，每次从种群中挑选出适应度最好的一组加入被选集合，重复该操作直到挑出  $0.5 \times N_{ind}$  组新坐标作为子代，然后将选出来的个体和父代合并进行下一次的进化，每个个体  $i$  被选中的概率为  $P(i)$  为

$$P(i) = \frac{F(i)}{\sum_{i=0}^{N_{ind}} F(i)}. \quad (14)$$

### 3.2.5 子种群数目

子种群数目的多少与最优解的结果和计算时间息息相关。图 5 表示了不同子种群数目迭代了 100 次的收敛情况，图中不同颜色曲线依次代表子种群数目为

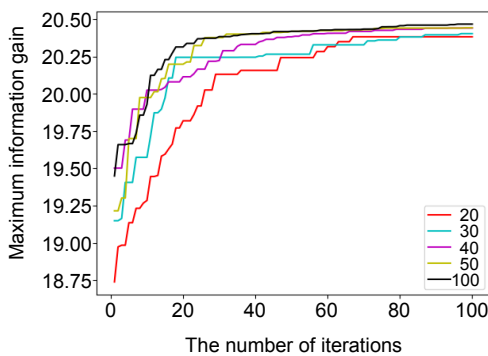


图5 遗传算法中不同子种群数目的收敛效果  
Fig. 5 Convergence effect of different subpopulations

20, 30, 40, 50, 100，不同数目的计算在 60 代附近都达到收敛状态。虽然子种群数目越多，信息增益越大，但是运算时间也越长。本文主要考虑多个廓线下导引星的统计最优位置，信息增益的微小的差异可以忽略不记。所以最终选用的子种群数目为 20。

### 3.3 计算时间加速过程

与蒙特卡洛法模拟相比，采用地面层自适应光学系统简化几何模型的计算速度得到了提升。但作为遗传算法中需要不断迭代优化的目标函数，其运行时间仍然较长(子种群数为 1 时，计算一条廓线下的地面层自适应光学系统性能需要近 1 h)。

如果遗传算法迭代 50 次获得导引星最优值，对单个廓线而言，至少需要两天的时间，所以迫切需要提高整个过程的运算速度。

本文采用多进程、多线程和具有高性能计算能力的 Numba 库，分别对几何模型中计算量较大的模块和遗传算法子种群中多个独立个体部分进行并行处理。表 5 列出了研究过程中在算法不同部位的加速方法以及不同数目子种群个体下的运行时间。从表中可以看出，在几何模型中使用多线程，遗传算法中使用多进程的加速方法效果最有效(子种群个体为 20 时，加速比可达到 3240 : 1)。

## 4 实验结果与分析

利用遗传算法，本文分别对不同实测台址廓线下的导引星位置，以及同一台址湍流廓线下不同数目的导引星位置做优化。

### 4.1 单条湍流廓线数据下的导引星位置优化分析

首先在帕拉纳尔观测台址下随机选取一条大气湍流廓线数据，用表 1 的地面层自适应光学系统参数，通过遗传算法计算 5 次该廓线数据对应的导引星最优位置，结果如图 6 所示。图 6(a)~6(e) 依次是 5 次的位置结果，图 6(f) 是 5 次总体结果，以下各图均用极坐

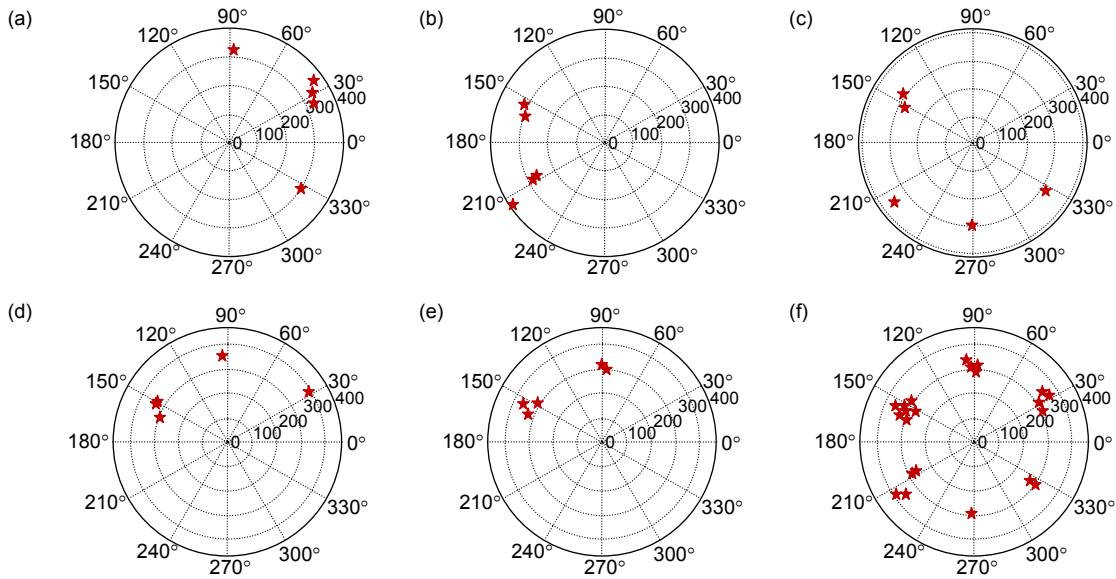


图 6 一条湍流廓线数据下 5 次激光导引星位置结果。

(a)~(e) 分别为 5 次相同条件下的导引星位置结果; (f) 5 次位置的统计结果

Fig. 6 The position results of the laser guiding star for five measurements with single turbulent profile data. (a)~(e) The results of guiding star positions under the same condition for five measurements respectively; (f) Total positional results of five measurements

表 5 不同加速方案的运行时间结果对比

Table 5 Comparison of running time with different acceleration schemes s

加速方案	子种群数目							
	1	10	15	20	30	40	50	100
几何模型：多进程+Numba	3.5	33.5	48	65	96	128	164	321
几何模型：多进程+Numba 遗传算法：多线程	3.2	32.5	47	64	97.5	129	164	320
几何模型：多线程+Numba 遗传算法：多进程	15	15	18	21	25	38	43	78

标表示，其中极径为导引星半视场角上的位置，极角为圆周角上的位置。从计算结果可以看出，遗传算法算出的导引星位置在径向视场角的位置均为  $320''(5.3')$  左右，由于没有考虑风向的原因使角向圆周角的位置每次有所区别。

选取另一条大气湍流廓线数据计算其对应的导引星最优位置分布，经过多次计算，该廓线下导引星的优化位置都在视场正中心。图 7(a)~7(c)是选取 3 次的位置结果图，该结果证明了遗传算法计算同一个廓线最优位置时结果具有收敛一致性。

进一步分析上述两种位置排布不同的原因，图 8(a)和 8(b)分别画出了导引星位置呈正多边形和视场中心分布对应的大气湍流廓线，图中横坐标是标准化之后  $C_n^2$  的对数坐标，纵坐标为湍流高度，从图中可以看出

导引星位置分布为规则正多边形，对应的湍流强度集中在中底层，而导引星位置分布于视场中心时，湍流强度主要在中高层。由图 1 可知，与无限远处目标接近于平行光的传输路径不同，单个导引星测量的只是一定高度上到达望远镜口径的锥形路径上的波前畸变，高度和路径之外的大气湍流造成的波前畸变无法获得。当地面层大气湍流较强时，分散多颗导引星的排布可以保证校正整个视场内的科学目标图像质量。而当地面层湍流强度较弱时，高层大气对科学目标影响严重，多颗导引星分散分布会导致对不同视场的科学目标测量差异较大，因此导引星的位置分布更集中是一个相对稳妥的选择。另外，由于本论文提出模型更关注地面层自适应光学系统的相对性能，而非绝对性能。因此，目前尚无法衡量地面层湍流较弱时，地

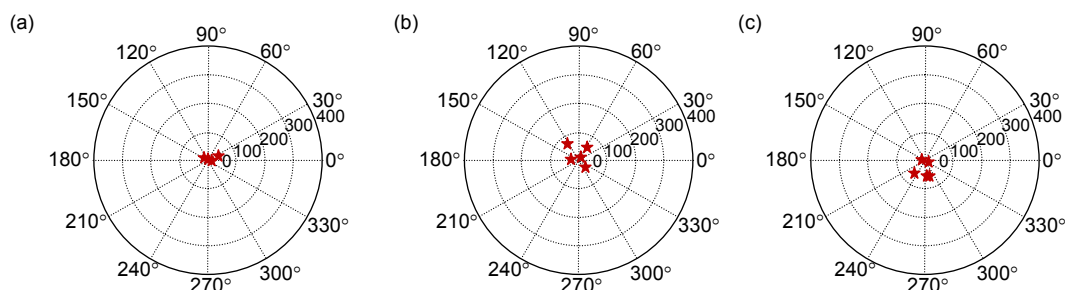


图 7 另一条湍流廓线数据下 3 次激光导引星位置结果。(a)~(c) 分别为 3 次相同条件下的导引星位置结果  
 Fig. 7 The position results of the laser guiding star for three measurements with another turbulent profile data. (a)~(c) The results of guiding star positions under the same condition for three measurements respectively

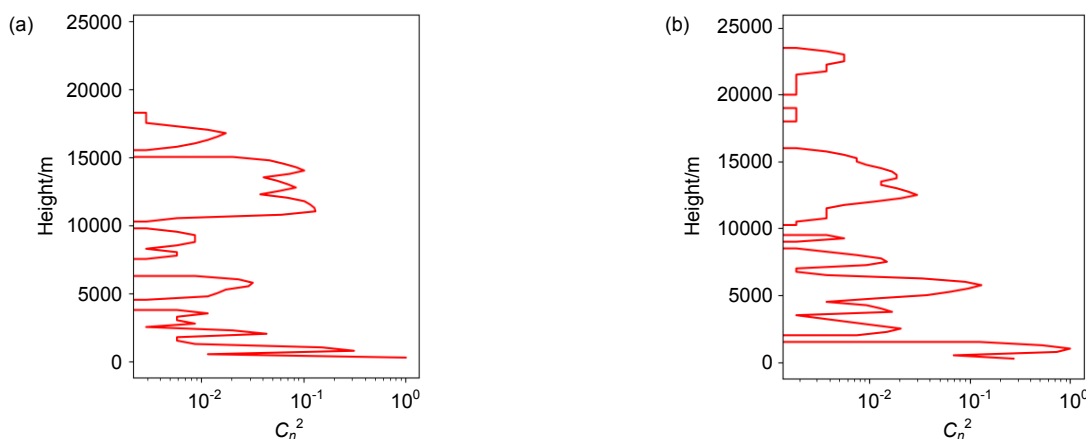


图 8 上述两种情形中对应的大气湍流廓线图。(a) 图 6 对应的大气湍流廓线图；(b) 图 7 对应的大气湍流廓线图

Fig. 8 Atmospheric turbulence profiles corresponding to the above two cases. (a) Atmospheric turbulence profile corresponding to Figure 6; (b) Atmospheric turbulence profile corresponding to Figure 7

面层自适应光学系统的绝对性能如何。但是，从导引星排布情况大致能发现，当优化结果出现如图 7 所示情况时，将可能伴随地面层自适应光学系统性能下降的情况。

#### 4.2 多条湍流廓线数据下的导引星位置优化分析

为了具体分析不同实测台址下湍流廓线与导引星位置的分布关系，本文从统计角度考虑，在获取的全部湍流中随机采样 2000 条帕拉纳尔和纳克亚山观测台址下的廓线数据，用遗传算法计算实测湍流廓线下导引星的最优位置。在湍流廓线到导引星位置这个映射空间内，每条湍流廓线之间彼此相互独立，而且随机采样过程中每个样本都服从同一个分布。机器学习理论指出服从独立同分布(i.i.d)的每个随机变量有着相同的分布形状和分布参数，即采样获得的湍流数据和该台址下对应的所有湍流数据有着相同的分布特

征。所以，在随机采样的湍流数据下计算出的导引星位置，可以反映出该台址下所有湍流廓线与其导引星位置分布的关系。

图 9(a)和 9(b)分别是两个观测台址在采样湍流数据下，用遗传算法多次计算得到的位置统计密度图，图中每个点代表一个导引星，颜色越深表示落在该位置的导引星数目越多。可以看出，两个观测台址下导引星位置集中分布的具体形状是不同的，但是均服从边缘呈正多边形以及中心一颗的规律。此计算结果表明，相比根据典型湍流模型计算出一致的导引星位置排布，本文提出的优化方案可以根据不同实测场景计算不同的导引星排布更有研究意义。

此外，发现帕拉纳尔的导引星位置分布更接近于规则的正多边形，其原因可能是由于莫纳克亚山测量的湍流廓线等效层只有 6 层，而帕拉纳尔测量的湍流廓线等效层具有 100 层。因此，对于大型光电望远镜，



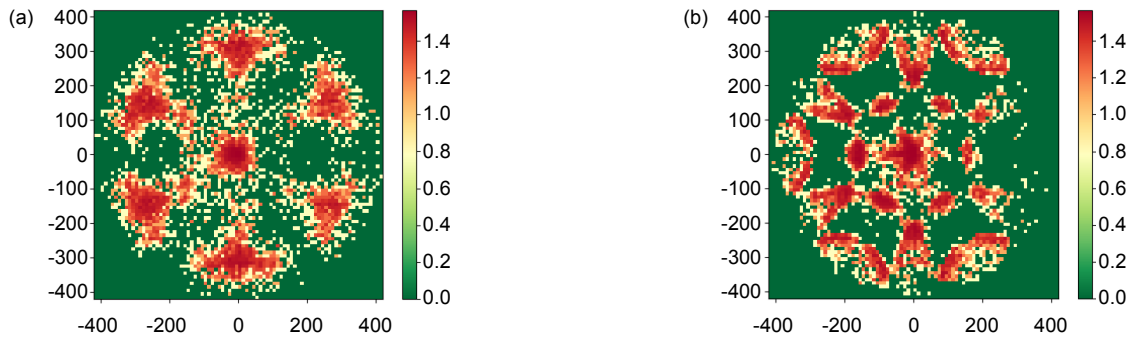


图9 不同观测台址下激光导引星的位置分布图。(a) 帕拉纳尔下的位置分布; (b) 莫纳克亚山下的位置分布  
Fig. 9 Location distribution of laser guiding stars at different observation stations. (a) Paranal; (b) Mauna Kea

需要尽可能多地获取高分辨率大气湍流廓线数据, 以利于包括地面层自适应光学系统在内的各类光电系统性能的评估和预研究。

#### 4.3 不同导引星数目下的位置优化分析

本文用遗传算法对 3、4 颗的导引星也做了位置优化分析, 图 10(a)、10(b)和图 11(a)、11(b)分别是用 500

条帕拉纳尔和莫纳克亚山的大气湍流廓线数据得到的三颗和四颗导引星的最优位置分布图。从图 10 和 11 中可以看出, 不同数目的导引星在同一台址下的位置分布类似, 此结果表明在近地面层自适应光学系统中, 不同数目的导引星对系统性能的影响远比大气湍流强度对系统的影响要小。

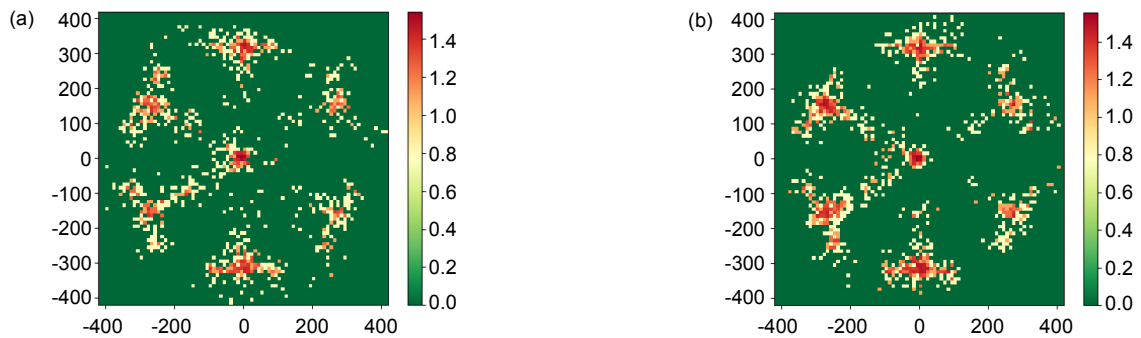


图 10 帕拉纳尔下 3 颗和 4 颗激光导引星的位置分布。(a) 3 颗星的位置分布; (b) 4 颗星的位置分布  
Fig. 10 The position distribution of three and four laser guiding stars in Paranal. (a) Three stars; (b) Four stars

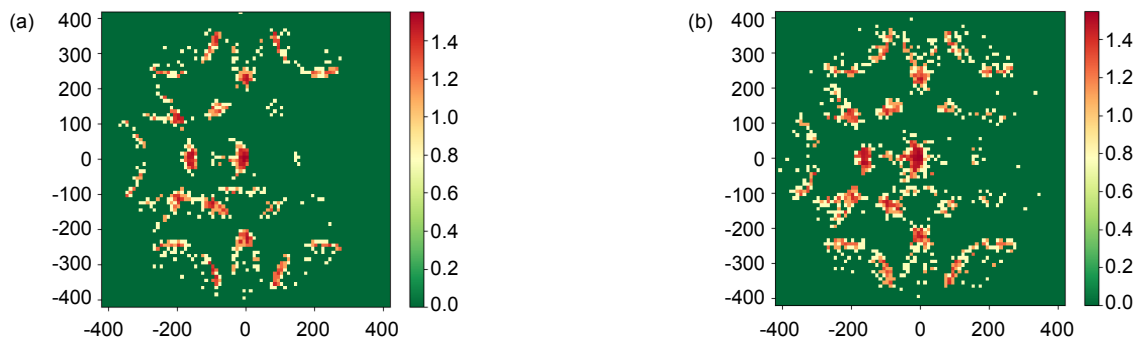


图 11 莫纳克亚山下 3 颗和 4 颗激光导引星的位置分布。(a) 3 颗星的位置分布; (b) 4 颗星的位置分布  
Fig. 11 The position distribution of three and four laser guiding stars in Mauna Kea. (a) Three stars; (b) Four stars

## 5 结论

目前激光导引星常用的正多边形排布模式一直是通过蒙特卡洛法多次模拟不同光学系统得到的,该过程需要消耗大量的计算资源,且模拟过程中用到的大气湍流模型无法反映随时间和空间变化的大气湍流特性。针对这两个问题,本文提出使用遗传算法作为导引星位置排布的方法,简化了地面层自适应光学系统几何模型作为遗传算法的目标函数,并且采用多线程、Numba库和多进程的方法对整个过程的加速。此方案作为激光导引星的位置优化方法不仅可以节省大量的时间,而且减少了一些不重要参数引起的计算资源消耗;最重要的是可以根据不同台址的实测大气湍流分析其对导引星位置排布的影响,从而使导引星最大化地提升地面层自适应光学系统的性能。

利用上述方法本文从统计角度,分析了两个实测台址下大气湍流强度对导引星的位置排布影响,以及同一台址下3、4、5颗导引星的位置排布结果。研究表明,不同观测台址下导引星的位置排布方式不同,其中获取 $C_n^2$ 的方法空间分辨率越高,导引星的位置就越呈规则的的正多边形。另外帕拉纳尔观测台址下的导引星位置结果表明,在强湍流集中于地面层的廓线下,导引星位置呈规则的的正多边形;在强湍流集中于中高层的廓线下,导引星位置位于视场中心。最后同一台址下3、4、5颗导引星的位置结果表明,导引星的数目对位置排布影响不大,同一台址下不同数目的导引星最优位置分布几乎一致,均呈正多边形或视场中心分布。

## 参考文献

- [1] Osborn J, Wilson R, Butterley T, et al. Profiling the surface layer of optical turbulence with SLODAR[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, **406**(2): 1405–1408.
- [2] Rigaut F. Ground-conjugate wide field adaptive optics for the ELTs[C]//*European Southern Observatory Conference & Workshop*, 2002.
- [3] Hart M, Milton N M, Baranec C, et al. A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide stars[J]. *Nature*, 2010, **466**(7307): 727–729.
- [4] Rabien S, Angel R, Barl L, et al. ARGOS at the LBT. Binocular laser guided ground-layer adaptive optics[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, **621**: 21.
- [5] Li M, Jiang C C, Wei K, et al. Design of the TMT laser guide star facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170735. 李敏, 江长春, 魏凯, 等. TMT激光导引星系统设计[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170735.
- [6] Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170489. 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170489.
- [7] Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, et al. Development of solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170733. 饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170733.
- [8] Zhou C N, Yan J X, Yu X, et al. Model analysis and computer simulation of atmosphere turbulence in adaptive optics system[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2): 249–251. 周昶宁, 阎吉祥, 俞信, 等. 自适应光学系统中大气湍流的模型分析与计算机仿真[J]. *光学技术*, 2005, **31**(2): 249–251.
- [9] Jia P, Osborn J, Kong L T, et al. Modelling synthetic atmospheric turbulence profiles with temporal variation using Gaussian mixture model[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **480**(2): 2466–2474.
- [10] Cai D M, Wang K, Jia P, et al. Sampling methods of power spectral density method simulating atmospheric turbulence phase screen[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(10): 104217. 蔡冬梅, 王昆, 贾鹏, 等. 功率谱反演大气湍流随机相位屏采样方法的研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(10): 104217.
- [11] Zhang Z L. Research on the simulation system of indoor atmospheric turbulence[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. 张智露. 室内大气湍流模拟系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [12] Liu C. Study on laser guide star high precise wavefront sensing and reconstruction methods[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2018. 刘超. 激光导星高精度波前探测与重构方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [13] Jia P, Basden A, Osborn J. Ground-layer adaptive-optics system modelling for the Chinese large optical/infrared telescope[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **479**(1): 829–843.
- [14] Wang H S, Yao Y Q, Liu L Y. A review of atmospheric optical turbulence modeling research[J]. *Progress in Astronomy*, 2012, **30**(3): 362–377. 王红帅, 姚永强, 刘立勇. 大气光学湍流模型研究进展[J]. *天文学进展*, 2012, **30**(3): 362–377.
- [15] Jia P, Cai D M, Wang D, et al. Simulation of atmospheric turbulence phase screen for large telescope and optical interferometer[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, **447**(4): 3467–3474.
- [16] Osborn J, Wilson R W, Sarazin M, et al. Optical turbulence profiling with stereo-SCIDAR for VLT and ELT[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **478**(1): 825–834.
- [17] Els S G, Schoeck M, Seguel J, et al. The Multi Aperture Scintillation Sensor (MASS) used in the site selection of the Thirty Meter Telescope (TMT)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7012**: 701222.
- [18] Zhang C, Zhan Z H. Comparisons of selection strategy in genetic algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, **30**(23): 5471–5474, 5478. 张琛, 詹志辉. 遗传算法选择策略比较[J]. *计算机工程与设计*, 2009, **30**(23): 5471–5474, 5478.
- [19] Hussain E A, Alrajhi Y M. Accelerated genetic algorithm solutions of some parametric families of stochastic differential equations[J]. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2015, **4**(1): 237–243.

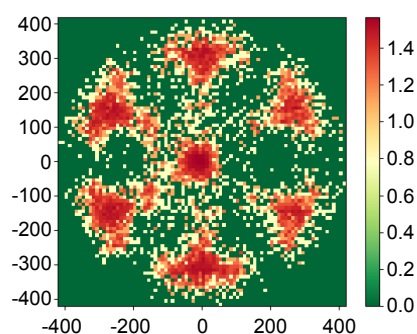
# Optimizing the location of multiple laser guide stars in ground layer adaptive optical systems

Li Caifeng<sup>1</sup>, Jia Peng<sup>1,2,3\*</sup>, Cai Dongmei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control Systems,  
Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>3</sup>Center for Advanced Instrumentation, Durham University, Durham DH1 3LE, UK



The density map of optimal locations of laser guide stars for a GLAO system in Paranal

**Overview:** The ground layer adaptive optic system (GLAO) uses wavefront sensors to measure wavefront errors from several different field of views and corrects the ‘mean’ wavefront errors from these measurements with a deformable mirror, which could slightly increase image quality in a wide field of view. The GLAO is particular useful for multi object observations, such as multi-object spectroscopic observations and wide field astrometry or photometry. The GLAO system normally assumes that there is a ground layer atmosphere turbulence in a fixed height, and thus it uses several laser-guide stars with fixed positions in the field of view to measure wavefront errors from that layer. However, the atmospheric turbulence is a stochastic medium and the height and strength of the ground layer will change continuously in real applications. Does there still exist optimal positions for these laser guide stars? Calculating the performance of the GLAO system with different configurations under different turbulence profiles is a straight forward method to obtain the optimal position of laser guide stars, but it will cost a very long time. In this paper, a simplified geometric model is proposed to evaluate the performance of the GLAO system. The genetic algorithm is used to obtain optimal positions of laser guide stars for different turbulence profiles from real measurements of different sites. Because there is a huge amount of atmospheric turbulence profiles, multi-processing, Numba library, and multi-thread techniques are used to further accelerate the computation speed up 3240 times that of the ordinary method. Based on the aforementioned methods, we have evaluated the GLAO performance with laser guide stars of different locations under different turbulence profiles from Paranal and Mauna Kea. We assume the turbulence profiles as random variables of independent and identically distributed and random sample a small batch (2000 turbulence profiles from different sites) to estimate the optimal position of laser guide stars. We have found that the optimal position of laser guide stars in the same site is almost the same and their statistically optimal positions are all regular polygon. However, we have also found that the spatial resolution of atmospheric turbulence profile measurements has strong impacts to the performance evaluation, showing that higher spatial resolution can lead to a more concentrated distribution of the laser guide stars. It indicates that it is necessary to obtain enough high-resolution turbulence profile data to better evaluate site conditions for China future large telescopes with GLAO systems.

**Citation:** Li C F, Jia P, Cai D M. Optimizing the location of multiple laser guide stars in ground layer adaptive optical systems[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190515

Supported by National Natural Science Foundation of China (11503018, U1631133), Shanxi Province Science Foundation for Youths (201901D211081), Research and Development Program of Shanxi (201903D121161), the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi (2019L0225)

\* E-mail: robinmartin20@gmail.com