

文章编号: 1001-4322(2007)09-1429-05

# 单双层共轭系统的共轭高度对等晕角的影响\*

荣 健, 丁学科, 白 宏, 李 芳, 申金娥, 王 秀

(电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054)

**摘 要:** 简要介绍了传统自适应光学系统的局限性和多层共轭自适应光学基本原理。模拟了单双层共轭校正系统的共轭高度,并结合平程与垂程(HV 模型)两种传输状态对系统等晕角增益作了进一步的分析。对单层共轭系统,在 20 km 的传输距离内,在平程中整个区域都属于等晕角放大区,共轭高度的最佳位置在传输距离的中间(约 10 km 处),等晕角取极大值,增益效果较好;但垂程中增益效果变差,且等晕角放大区也仅在 3.6 km 之内。对双层共轭系统来说,第 1 层共轭高度的变形镜主要对近距离畸变波前进行校正,并对整个传输距离的等晕角影响很大,是双层共轭系统的关键因素;第 2 层共轭高度对远距离等晕角影响较大。

**关键词:** 自适应光学; 单层共轭; 双层共轭; 共轭高度; 等晕角

**中图分类号:** TB133

**文献标识码:** A

自适应光学(AO)系统能实时感知由大气扰动、环境温度起伏等因素造成的波形畸变,并通过调整光学系统而实现实时畸变的补偿,因此在天文观测、信息获取和激光照射等领域有着广泛的应用前景。现代大型望远镜一般采用自适应光学系统,使望远镜的轴上分辨率达到近衍射极限的水平。但由于大气非等晕<sup>[1]</sup>的影响,传统 AO 的视场在典型情况下分辨率只有  $\mu\text{rad}$  量级。特别是当观察目标稍微偏离光轴时,分辨率便明显下降,这就大大限制了 AO 系统推广应用。为了解决这一问题,人们提出了多层共轭自适应光学(MCAO)方案。其基本思想就是将大气湍流分成若干层,在每层的共轭位置上设置 1 块自适应校正镜(变形镜 DM)以校正该层大气引起的波形畸变。如图 1 所示,采用 3 个变形镜将大气湍流分 3 层:湍流层 T1 直接被变形镜 DM1 校正;湍流层 T2 先经过 DM1 粗校正后再被 DM2 精确校正;湍流层 T3 先经过前 2 个 DM 粗校正后再被 DM3 精确校正。这样整个大气湍流层就得到较好的校正。这一概念由欧南台的 Beckers 在 1987 年首次提出,并于 1989 年得到进一步论证<sup>[2]</sup>。1993 年北京理工大学的阎吉祥等人推导出了基于简化湍流模型得到视场角增益与分层数的关系<sup>[3]</sup>,从而初步论证 MCAO 实现大视场校正的可能性。但多层共轭校正一个最基本的问题就是共轭高度的确定,共轭高度选取是否得当直接影响等晕角增益(系统等晕角与传统 AO 等晕角之比)的好坏,而等晕角又是决定校正视场大小的关键因素。本文根据相关文献给出的湍流模型数值模拟了单双层共轭校正系统的共轭高度,并结合平程和垂程两种传输状态对系统等晕角增益作了进一步的分析。

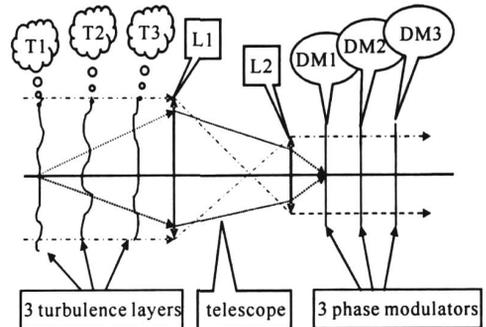


Fig. 1 Sketch map of simple MCAO design  
图 1 MCAO 系统校正示意图

## 1 等晕角的计算与共轭高度函数

在自适应光学系统中,根据 Tokovinin 等人的研究,MCAO 系统等晕角表达式为<sup>[4]</sup>

$$m = [2.905k^2 (\text{sec})^{8/3} \times C_n^2(h) F_m(h, H_1, H_2, \dots, H_M) dh]^{-3/5} \quad (1)$$

式中: $k = 2\pi / \lambda$ ;  $\theta$  为天顶角; $C_n^2(h)$  为折射率结构常数; $F_m(h, H_1, H_2, \dots, H_M)$  是一个依赖于各变形镜共轭高度的函数。

\* 收稿日期:2007-03-05; 修订日期:2007-07-03  
基金项目:国家自然科学基金资助课题(60572079)  
作者简介:荣 健(1962—),男,武汉人,教授,博导,主要从事自适应光学与大气光通信研究;rongjmail@163.com。  
联系作者:丁学科(1980—),男,江西临川人,硕士研究生,主要从事自适应光学与大气光通信研究;jx\_dxk@126.com。

对于单个变形镜、共轭高度为  $H_1$  的共轭系统,共轭高度函数为

$$F_1(h, H_1) = |h - H_1|^{5/3} \quad (2)$$

当共轭高度  $H_1 = 0$ , 即共轭位置在系统入瞳面上, 则  $F_1(h) = h^{5/3}$ , (1) 式简化为

$$\theta_0 = [2.905 k^2 (\text{sec})^{8/3} C_n^2(h) h^{5/3} dh]^{-3/5} \quad (3)$$

式(3)就是传统 AO 系统的等晕角计算公式, 此  $\theta_0$  称为 Fried 等晕角<sup>[5]</sup>, 说明传统 AO 系统是单层(多层)共轭校正系统一种的简化。

两个变形镜, 双层共轭高度分别为  $H_1$  与  $H_2$ , 则其共轭高度函数为

$$F_2(h, H_1, H_2) = 0.5 |h - H_1|^{5/3} + 0.5 |h - H_2|^{5/3} - 0.25 |H_2 - H_1|^{5/3} - 0.25 |H_2 - H_1|^{-5/3} (|h - H_1|^{5/3} - |h - H_2|^{5/3})^2 \quad (4)$$

当变形镜为 3 个或更多时, 其共轭高度函数相当复杂, 本文仅限于单双层共轭系统的研究, 这类系统是多层共轭系统的最简单的结构, 且很有实用价值。

## 2 共轭高度与等晕角

共轭高度的选取, 也就是变形镜校正湍流层高度位置的确立, 是 MCAO 中的一个关键问题。共轭高度的选取不同直接影响等晕角增益的好坏。本文从平程和垂程两种传输模式下分别对单双层共轭系统进行探讨。平程模式(相当于均匀大气模型)讨论问题简洁方便, 但实际应用比较少, 主要应用于同高度层的扫描跟踪系统; 而垂程模式在理论上遇到大气模型的选择问题, 不同的大气模型有不同的结果, 主要应用于遥感系统(机载和星载)。因此本文结合两者, 取长补短, 使论证更充分。一般情况下当天气比较好时近地面的大气折射率结构常数  $C_n^2$  取  $1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ , 文中的平程传输运用此值。而垂程, 我们引用目前比较通用的 HV (Hufnagel-Valley model) 模型<sup>[6]</sup>

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (v/27)^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + 1.7 \times 10^{-14} e^{-h/1000} \quad (5)$$

式中:  $h$  表示海拔高度, 单位为  $\text{m}$ ;  $v$  为风速, 一般取  $21 \text{ m/s}$ 。一般的机载系统大都处在平流层, 其高度一般不超过  $20 \text{ km}$ 。尽管天文学中的星载系统都在  $400 \text{ km}$  以上, 如卫星遥感, 天文探测, 但大气在  $20 \text{ km}$  高度以外湍流很弱, 其影响非常小, 因此我们假设湍流总高度为  $20 \text{ km}$ 。为了研究问题的方便, 无论平程还是垂程, 都选择  $20 \text{ km}$  的最大传输距离, 取  $0.5 \mu\text{m}$  波长入射平面波。

### 2.1 单层共轭校正系统

#### 2.1.1 等晕角随共轭高度的变化

我们假定传输距离为定值(取  $20 \text{ km}$ ) 来研究共轭高度对等晕角的影响。图 2 是平程和垂程时等晕角随共轭高度变化关系, 当共轭高度为 0(入瞳面)时, 系统等晕角为传统 AO 等晕角  $\theta_0$ 。平程传输中, 共轭高度选在任何位置都比传统 AO 等晕角大, 整个区域都属于等晕角放大区。而在 HV 模型的垂程中, 仅在  $3.6 \text{ km}$  内才比传统 AO 等晕角大, 超过  $3.6 \text{ km}$  就属于等晕角缩小区。但两种状态都有个等晕角最大值(极值), 其对应的共轭高度分别为  $10 \text{ km}$  (恰在传输距离的中间) 和  $1.5 \text{ km}$ 。光学系统最大等晕角对应的共轭高度为最佳共轭高度, 那是校正系统设计的最佳参考值。这里需要特别说明: 平程中的共轭高度不是海拔高度, 而是指共轭位置离校正系统入瞳面的距离。

#### 2.1.2 等晕角随传输距离的变化

图 3 为单层共轭系统在平程(0, 2, 4, 6 和  $8 \text{ km}$ ) 和垂程(0, 1, 2, 3 和  $4 \text{ km}$ ) 中不同共轭高度下等晕角与传输距离的关系。可以看出, 等晕角随传输距离的增加而减小。当共轭高度增大, 近距离等晕角变小, 等晕角曲线变缓。当传输距离小于共轭高度时, 畸变波前只能得到变形镜的粗校正, 所以等晕角比传统 AO 等晕角小。

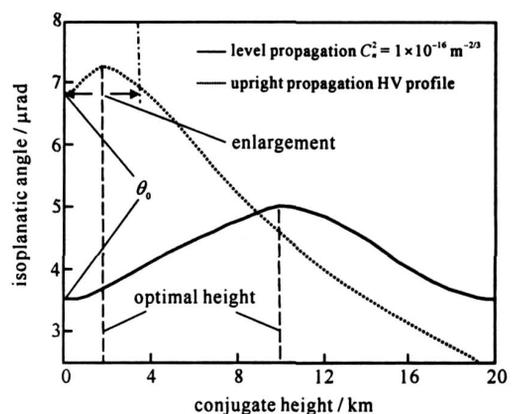


Fig. 2 Isoplanatic angle vs conjugate height in level and upright propagation

图 2 平程和垂程等晕角与共轭高度关系

但当传输距离超过共轭高度时,变形镜则起到精校正作用,等晕角也随之大于传统 AO 等晕角。平程中等晕角增益点正好在共轭高度位置处,但 HV 模型垂程的增益点并不在共轭位置,而是向后推移很长距离。从图 3 (b) 中看出,共轭高度为 1 km 时增益效果较好,但上升到 2~3 km 时,增益效果一直降低,而为 4 km 时,则整个传输过程等晕角都比传统 AO 小。那可能是因为湍流主要集中在近地面范围,当变形镜的共轭高度超出湍流密集区时,错过了最佳的校正时机,校正效果自然降低,等晕角也随之减小。所以在 HV 模型垂程传输中,单层共轭高度应该选在 4 km 之内,与图 2 结论吻合。因此,对于传输距离不太远的光学系统,则可以选用传统 AO 进行校正。

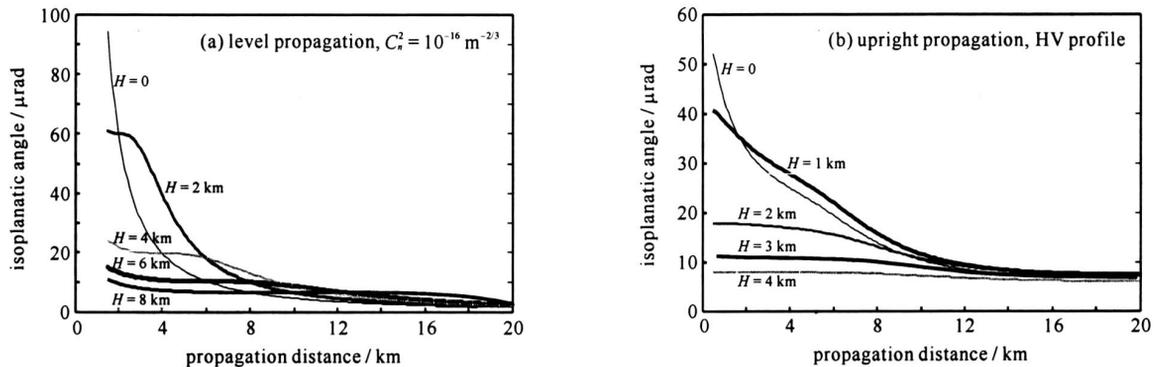


Fig. 3 Isoplanatic angles for different conjugate heights in level propagation and upright propagation

图 3 不同共轭高度下平程中和垂程中的等晕角

### 2.2 双层共轭校正系统

双层共轭系统相对单层共轭系统复杂了不少:两个变形镜,对应两层共轭高度,因此需要对两层共轭高度分别考虑。图 4 是平程时的双层共轭系统的等晕角,其中图 4(a)是共轭高度第 1 层相同(4 km),第 2 层不同(10,12,14 和 16 km)时的等晕角;而图 4(b)是共轭高度第 2 层相同(14 km),第 1 层不同(3,4,5 和 6 km)时的等晕角。能够看出,第 1,2 层共轭高度的变形镜分别主要是对近、远距离的波前校正。当第 1 层共轭高度相同时,则近距离等晕角近乎相等;第 2 层共轭高度离第 1 层越远,则曲线中间部分越陡,等晕角随传输距离衰减越快,当传输到远距离时,曲线变缓,等晕角反而比其他的等晕角大,但相差并不大。当第 2 层共轭高度相同时,则远距离等晕角近乎相等;第 1 层共轭高度离入瞳面越近(距第 2 层共轭高度越远),等晕角曲线越陡,近距离等晕角越大,且相差悬殊,而且整个传输距离的等晕角都比其他等晕角大,因此第 1 层高度对整个传输距离有很大影响。所以双层共轭校正系统中第 1 层共轭高度的合理选取尤为重要。

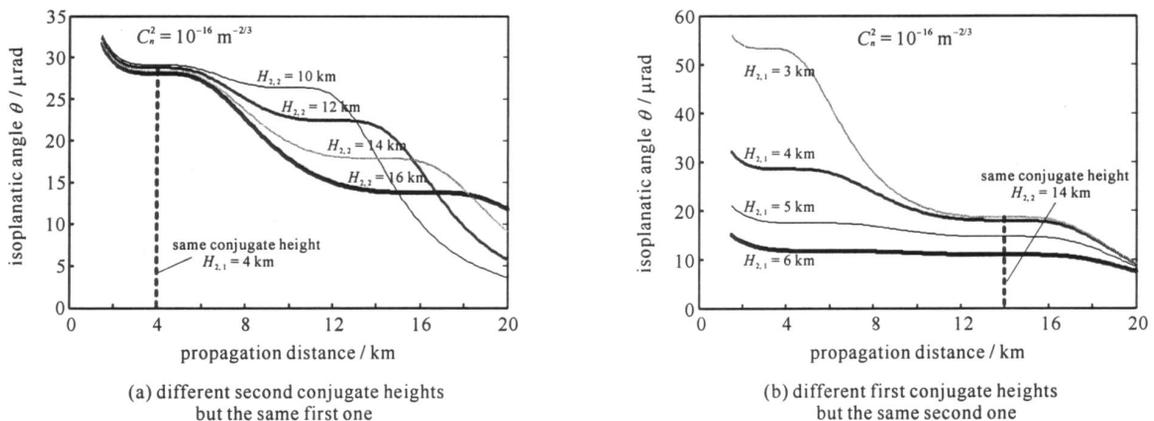


Fig. 4 Isoplanatic angles for different conjugate heights of dual-conjugate in level propagation

图 4 平程中双层共轭系统不同共轭高度的等晕角

图 5 是 HV 模型下垂程时的双层共轭系统等晕角:其中图 5(a)是共轭高度第 1 层相同(1 km),第 2 层不同(10,12,14 和 16 km)时的等晕角;图 5(b)是共轭高度第 2 层相同(14 km),第 1 层不同(0.5,1,2 和 3 km)时的等晕角。大致结果与平程近似,但因为 HV 大气模型在近地面范围湍流强度很强且随高度变化大(从  $10^{-14}$  量级变化到  $10^{-16}$  量级),而远距离湍流强度弱( $10^{-17}$  量级)且随高度变化小的原因,得到的结果还是有较大的差异。从图 5(a)看出远距离等晕角并不随第 2 层共轭高度的增大而增加,而是有一个最佳值,大约是 12 km。

而图 5(b) 也说明第 1 层共轭高度不仅决定近距离等晕角, 还对整个传输距离等晕角有很大影响, 稍微一点改变都将导致整个传输距离等晕角很大变化。虽然第 2 层共轭高度相同, 但远距离等晕角却大大不同。第 1 层共轭高度大约在 1 km 处时整个传输距离等晕角才处于较好的状态, 因此在 HV 模型中, 双层共轭系统的共轭高度的选取约 1 km 和 12 km 是比较理想的, 那样整个传输距离的等晕角则能保持较佳状态。当然那是针对 20 km 的传输距离而言, 如果传输距离改变那么最佳共轭高度位置也将改变。如果选择其它大气模型, 则得出的最佳共轭高度值也将改变, 因此在这项研究中大气模型的选择也很关键。

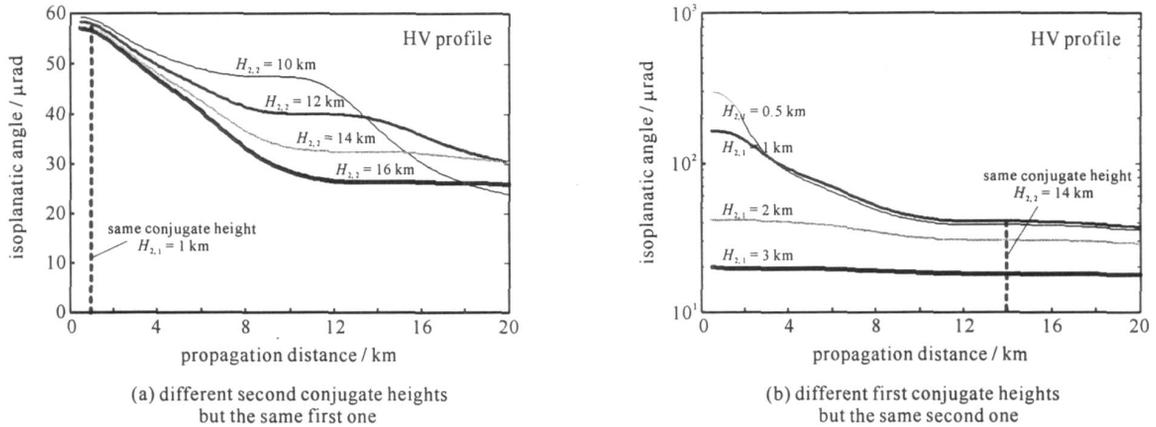


Fig. 5 Isoplanatic angles for different conjugate heights of dual-conjugate in upright propagation

图 5 垂程中双层共轭系统不同共轭高度的等晕角

### 3 与实验结果比较

在实际应用中, 比较典型的是天文观察。我们引用 Masciadri 等人对 MCAO(单层、双层和三层) 的实验研究数据<sup>[7]</sup>, 此实验是 2001 年在德国的 San Pedro Martir 天文观察台进行的。这里仅选取其中单双层共轭系统的实验结果。图 6(a) 是表示单变形镜最佳共轭高度的年变化, 其起伏大, 在 0.3 ~ 4.8 km 高度之间浮动。图 6(b) 是双层最佳共轭高度的年变化, 其起伏相对较小, 但也不稳定, 分别在 1 和 12 km 高度处起伏。尽管试验传输距离几乎无穷远(包含整个大气层), 但与上述的理论结果(20 km 有限距离) 还是比较吻合的。

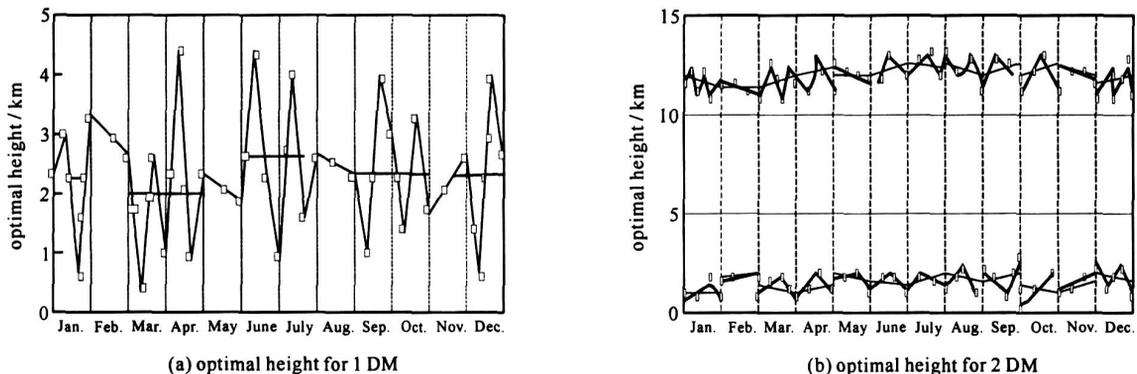


Fig. 6 Optimal heights to conjugate DM in 2001 at San Pedro Martir

图 6 2001 年 San Pedro Martir 观察到的最佳共轭高度年变化图

### 4 结 论

通过数值模拟可以看出, 等晕角随着传输距离的增加而减小。传统 AO 系统等晕角在近距离处较大, 随距离增加而急剧减小, 对传输距离不远的光学系统校正比较适应。单、双层共轭系统等晕角增益与共轭高度的选取密切相关。对单层共轭系统来说, 在平程中整个区域都属于等晕角放大区, 共轭高度的最佳位置在传输距离的中间, 等晕角增益效果比较好; 但在垂程中增益效果变差, 而且等晕角放大区也仅在 3.6 km 之内。对双层共轭系统来说, 第 1 层共轭高度的变形镜不仅对近距离湍流校正, 还对整个传输距离的等晕角的影响也很大, 是双层共轭系统共轭高度选取的关键点。第 2 层共轭高度主要影响远距离等晕角, 但也要慎重选取, 因为很多实际应用中观察目标几乎是无穷远。

**参考文献:**

- [1] 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 205-217. (Zhou R Z, Yan J X. Theory of adaptive optics. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 205-217)
- [2] Beckes J M. Multi-conjugate adaptive optics: experiments in atmospheric tomography[C]// Proc of SPIE. 2000, **4007**: 1056-1065.
- [3] Yan J X, Zhou R Z, Yu X. Calculation of the isoplanatic patch for MCAO[J]. *Opt Eng*, 1993, **32**(12): 3161-3163.
- [4] Tokovinin A, Le Louarn M, Sarazin M. Isoplanatism in a multi-conjugate adaptive optics system[J]. *Opt Soc Am A*, 2000, **17**: 1819-1827.
- [5] Fried D L. Anisoplanatism in adaptive optics[J]. *Opt Soc Am*, 1982, **72**: 52-61.
- [6] 张逸新. 湍流大气中激光传输波前扭曲规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005. (Zhang Y X. Wave front twist of a laser beam propagation in an atmosphere turbulence. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005)
- [7] Masciadri E, Egner S. First complete seasonal variation study of the 3D optical turbulence above San Pedro Martir observatory[C]// Proc of SPIE. 2004, **5490**: 818-829.

## Effects of conjugate heights of single and dual-conjugate adaptive optics systems on isoplanatic angle

RONG Jian, DING Xue-ke, BAI Hong, LI Fang, SHEN Jirre, WANG Xiu

(School of Physical Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The limitation of classical adaptive optics and the basic principle of multi-conjugate adaptive optics are briefly introduced. The conjugate heights of single-conjugate and dual-conjugate systems are numerically simulated, and the gains of isoplanatic angle are demonstrated combined level-propagation and upright-propagation. The simulated results indicate that when the propagation distance is 20 km, the conjugation height has notable effect on the gain of the isoplanatic angle. For a single-conjugate system, the gain of isoplanatic angle is good in level propagation, but bad in upright, and the range of enlargement is limited during 3.6 km. For a dual-conjugate system, the deformable mirror for the first conjugate height mostly corrects the atmospheric turbulence near the pupil plane, and the second conjugate height only affects the far isoplanatic angle. However, the first conjugate height is more important, which impacts the isoplanatic angle throughout the whole process.

**Key words:** Adaptive optics; Single-conjugate; Dual-conjugate; Conjugate height; Isoplanatic angle