

# 用于自适应光学系统的激光引导星

熊 耀 恒

(中国科学院云南天文台 昆明 650011)  
(中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

## 摘 要

自适应光学系统应用于天文观测时应满足一些技术要求, 其中的关键技术之一是自适应光学系统为了对畸变的光波进行采样, 需要在其很小的等晕角内有足够的信标强度. 激光引导星, 即人造信标, 就是解决这种问题的方法之一. 特别是在观测天文暗目标时, 其自身的光强度不能为波前探测提供信息, 激光引导星就显得非常重要. 根据国际上的最新进展对激光引导星技术给予了介绍, 重点介绍了激光引导星的局限性, 对近几年提出的对激光引导星可能的倾斜测量技术也进行了简介.

**关键词** 自适应光学 — 激光引导星 — 波前倾斜探测

**分类号**: P111.33

## 1 引 言

经过二十多年的发展, 实时补偿由于大气湍流扰动所产生的光波波前畸变的自适应光学技术已经成为地基光学天文望远镜观测技术的重要部分. 越来越多的有意义的天文成像通过自适应光学系统获得. 根据 1998 年的统计资料, 已经有 8 个运用自然引导星和 3 个配备激光引导星的自适应光学系统运行在大型天文望远镜上, 并且还有十几个自适应光学系统正在建造或者接近完成<sup>[1]</sup>.

自适应光学系统由两个基本部分组成: 波前探测和波前改正. 波前探测器用于测量出望远镜内由于大气湍流引起的波前相位起伏, 其测量结果用于控制变形镜作波前改正以补偿波前相位畸变. 为波前探测器提供波前信号的可以是待测星体, 或者是待测星体附近的引导星. 根据自适应光学的特点, 太暗的待测星体不能提供足够的波前信号, 这时候需要应用自然的或者人造参考引导星. 而这些引导星需要满足下面两个基本条件: (1) 来自引导星的参考波面必须在待测天体的等晕角内, (2) 引导星必须足够亮, 使它能为波前探测器提供合适的探测信号. 对于天文成像, 这两个条件意味着必须在所有观测方向上, 在等晕角内有足够亮的参考引导星. 在  $4\mu\text{m}$  的红外波段, 其等晕角在  $100''$  量级, 故很容易实现红外区域在全天空的成像; 而可见光 ( $0.5\mu\text{m}$ ) 的等晕角仅为  $7''$ <sup>[2]</sup>! 如果引导星亮度必须在 12 mag 以上, 在银极

上适合的自然星密度仅接近每平方度 10 颗, 这种密度相对于可见光等晕角的大小来说接近为零, 即其天空覆盖率为零。从而使自适应光学在天文应用中受到限制。

为了克服这些限制因素, 一些新的系统概念和方法相继提出并且加以验证, 取得了一系列进展。这些方法有:

- 自适应光学系统在红外波段 ( $2 \sim 4\mu\text{m}$ ) 工作, 其相干长度和等晕角增大, 时间带宽缩小; 或者双波长工作, 即在可见光波段探测, 在红外波段作波前校正与观测。
- 选择良好的大气条件 (Fried 参数  $r_0 = 15 \sim 20\text{cm}$ ) 的台址, 使系统简化。
- 部分校正的概念, 即使 Strehl 比达到 0.5 或更小也可以得到接近衍射极限的像。
- 多层共轭方法, 扩大自适应系统的视场。
- 采用激光引导星以提供人造参考信标, 使得附近没有亮星的弱目标也能得到补偿。

## 2 自适应光学中的激光引导星

### 2.1 激光引导星的发展与现状

1985 年 Foy 和 Labeyrie 首次公开提出了激光引导星的概念, 即利用某些特殊大气层的后向散射特性, 从地面发射的激光束能产生指向任何方向的人造信标<sup>[3]</sup>。两年后, Thomason 和 Gardner 在夏威夷 Mauna Kea 的 2.2m 望远镜上成功地应用了首例公开报道的钠层激光引导星<sup>[4]</sup>, 接着他们发展了激光引导星的系统理论<sup>[5]</sup>。

美国军方的研究机构于 1991 年 5 月将他们十多年的自适应光学和激光引导星研究的结果解密。从中可了解激光引导星更早的发展过程: 第一次利用激光后向散射产生引导星是美国 Litton Itek 光学公司的 Hudgin 在 1980 年建议的; 1981 年美国自适应光学协会的 Feinlieb 也提出类似的概念; 同时美国光学科学公司的 Fried 研究了激光引导星及其非等晕性问题<sup>[6]</sup>。在军方的支持下, 美国一些研究机构秘密地进行了一系列自适应光学和激光引导星的研究, 取得了重大进展。美国空军 Phillips 实验室的 Fugate 和其同事于 1983 年在位于新墨西哥州的 Starfire 光学靶场完成了第一例 Rayleigh 激光引导星实验<sup>[7]</sup>; 而 MIT 的 Lincoln 实验室也于 1984 年在夏威夷 Maui 岛上进行了首例钠层激光引导星的试验<sup>[8]</sup>。这些研究机构获得大量的成果并且保持了在自适应光学研究中的领先地位。像 Phillips 实验室的配置 Rayleigh 引导星的 1.5m 自适应光学望远镜自 1989 年以来在军事和天文上都取得许多有意义的成果, 是最成功的自适应光学望远镜之一。

实现人造激光引导星的途经有两条, 即利用大气钠层的共振散射 ( $90 \sim 95\text{km}$  高度) 和大气中氮或氢的后向 Rayleigh 散射 ( $10 \sim 20\text{km}$  高度)。目前, Rayleigh 引导星技术已经较为成熟, 其所用激光器的性能是一些商用产品所能达到的, 如固体激光器和准分子激光器。像美国 Illinois 大学使用 XeF 准分子激光器在 Wilson 山 2.5m Hooker 望远镜的 Rayleigh 单引导星和多重引导星即将投入使用<sup>[9]</sup>。钠层引导星所用的激光器近年来正在广泛开展研究和试验, 并已取得进展。例如: 美国 Lick 天文台在其 3m 望远镜使用调谐到  $0.589\mu\text{m}$  的染料激光器, 其功率为 20W, 重复率 11kHz, 脉宽 150ns, 已经应用于天文观测<sup>[10]</sup>; 正在建造与调试中的 Keck II 和 ESO VLT 望远镜都配置了钠层引导星<sup>[11,12]</sup>。两种类型的激光引导星在自适应光学望远镜的天文应用中已经发挥了重大作用。

### 2.2 对激光引导星亮度和等晕角的要求

现今常用的波前探测器是 Hartmann-Shack 探测器。它用一透镜阵列将望远镜光学系统的孔径分成若干子孔径，在每个子孔径中将探测面上的质心偏移转换为波前倾斜。子孔径的大小和探测器的积分时间限制了引导星的光强度。子孔径通常取 Fried 相干长度  $r_0$  的量级<sup>[13]</sup>；对于积分时间来说，畸变波前的采样时间应该短于波前变化的时间，所需要的闭环带宽在  $0.5\mu\text{m}$  时为几十到几百 Hz。实践中，对扰动的采样应该比其变化快 6~10 倍。但采样越快，也就要求引导星的亮度越亮。

在每个子孔径内每次采样中探测到的光子数为：

$$N = \Phi A \tau_{\text{int}} \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{QE}} \quad (1)$$

这里  $\Phi$  是单位时间望远镜每  $\text{m}^2$  口径接收到的光子数； $A$  是子孔径的面积； $\tau_{\text{int}}$  是波前探测器的积分时间； $\eta_{\text{opt}}$  是光学透过率； $\eta_{\text{QE}}$  是探测器的量子效率。如果  $N = 150$ ,  $\tau_{\text{int}} = 2.5\text{ms}$ ,  $\eta_{\text{opt}} = 30\%$ ,  $\eta_{\text{QE}} = 50\%$ ，同时  $r_0 = 15\text{cm}$ ，一个自适应光学系统在  $2\mu\text{m}$  的波段运行，就需要一个 14 mag 的引导星；如果在  $0.5\mu\text{m}$  波段运行，则要求有 9 mag 的引导星，在台址的  $r_0 = 7\text{cm}$  时，12mag 的引导星是必须的。

等晕角  $\theta_0$  定义为在其间光学系统的光学传递函数 OTF 近似不变。对一个自适应光学系统来说，如果其待测目标与引导星间的角度恰是该系统的等晕角  $\theta_0$ ，那么此时产生的波前误差为  $\lambda/8$ <sup>[14]</sup>。通常将大气湍流效应近似视为在高度为  $h_0$  的单层里，这时的等晕角：

$$\theta_0 \approx r_0/3h_0 \quad (2)$$

如果待测星与引导星之间的角度是  $\theta$ ，由此非等晕性引起的波前方差为  $(\theta/\theta_0)^{5/3}$ 。对自适应系统而言，其等晕角  $\theta_0$  是很小的，且随  $\lambda^{6/5}$  增加。

### 2.3 激光引导星及其基本参数

有两种大气散射过程可以提供返回的激光信号以产生引导星：(1) 同温层中的氮分子或氢分子对光的后向 Rayleigh 散射所产生的引导星 (10~20 km 高度)，(2) 散逸层钠原子在  $0.589\mu\text{m}$  的  $D_2$  线的共振荧光散射产生的钠层引导星 (90~95 km 高度)。图 1 为这两种激光引导星的示意图。产生激光引导星所需要的每个脉冲的激光能量为<sup>[15]</sup>：

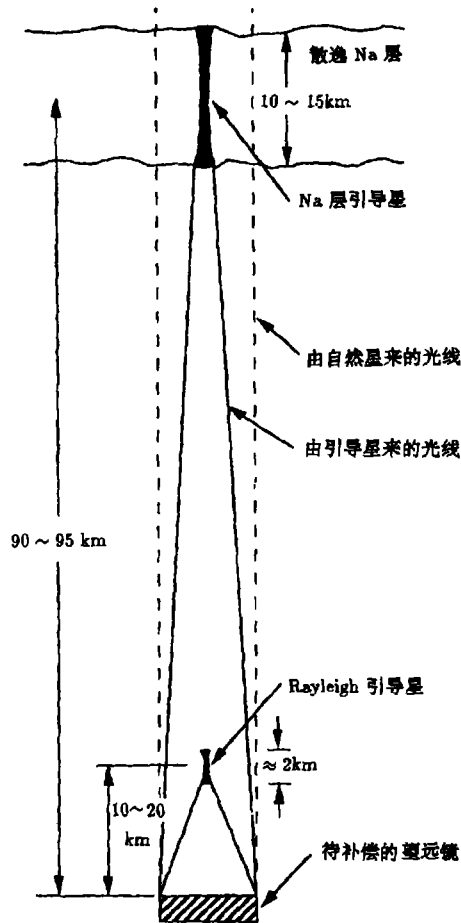


图 1 由 Rayleigh 和 Na 层散射产生的激光引导星

$$E = N h c h_0^2 / \lambda A \beta \Delta l \eta_{\text{QE}} T_i T_r T_{\text{atm}} \quad (3)$$

这里  $N$  是要求每个子孔径探测到的返回光子数, 通常取 150;  $hc/\lambda$  是单个光子在  $0.5\mu\text{m}$  波长的能量;  $h_0$  是望远镜到引导星的距离;  $A$  是波前探测器子孔径的面积,  $\beta$  是单位立体角内单位散射长度上的散射光子;  $\Delta l$  是散射柱体上的门限长度;  $\eta_{\text{QE}}$  是波前探测器的量子效率 (通常取 0.5);  $T_t$ 、 $T_r$ 、 $T_{\text{atm}}$  分别是发射光路、接收光路和大气透射率 (取 0.5, 0.3 和 0.75)。

对于 Rayleigh 散射,  $\beta$  正比于  $\lambda^{-4}$  和大气压力, 反比于温度, 在波长  $0.5\mu\text{m}$  及  $10\text{km}$  高度有近似值  $5 \times 10^{-7} \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。门限长度对应于引导星在子孔径的探测面上开始不能被分辨的情况, 即  $\Delta l = 2\lambda R^2(Sd)$ ,  $S$  为探测面的直径,  $d$  为子孔径直径。

对于  $90\text{km}$  高度的钠层引导星, 方程 (3) 中的  $\beta\Delta l$  可由  $C_s\sigma_t/4\pi$  来代替。  $C_s$  是钠柱体的密度 ( $\approx 5 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ ),  $\sigma_t$  是总散射截面 ( $\approx 8 \times 10^{-16} \text{m}^2$ )。这些值使得总散射率为  $0.0032 \text{sr}^{-1}$ 。由于散射方向上比其它方向强 50% 左右, 使得总散射率为  $0.0048 \text{sr}^{-1}$ 。

在钠层散射中存在着饱和效应, 它以因子  $(1 + I/I_s)^{-1}$  来降低散射率。  $I$  是入射激光光束的强度,  $I_s$  是饱和强度 ( $\approx 1.5 \sim 3 \text{W/cm}^2$ )。对钠层引导星的激光器有特别的要求, 如需要特定的激光波长 ( $0.589\mu\text{m}$ )、较长的激光脉宽、高重复率、大脉冲功率和小发散角。

激光引导星的大小也影响波前探测器的精度。为达到最大质心精度, 假定激光引导星的直径  $\Delta\alpha$  等于孔径的角分辨率:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= 2.44\lambda/d, & d \leq r_0 \\ \Delta\alpha &= 2.44\lambda/r_0, & d > r_0 \end{aligned} \quad (4)$$

当  $d > r_0$  时, 由 (4) 式所得的像径就对应于自然星的尺寸。如果一个自适应光学望远镜工作在  $0.5\mu\text{m}$ , 且  $d = r_0 = 20\text{cm}$ , 那么激光引导星在其强度的  $e^{-2}$  处的像径就有  $1.26''$ 。如果需要, 由大气湍流引起的光束摆动和扩散可通过一个相位改正发射望远镜来补偿。

通过波前探测器的门限, 可以得出所取散射层的厚度  $\Delta h$ 。为保证引导星的像径等于  $\Delta\alpha$ , 波前探测器必须加以门控, 使得高度范围  $\Delta h$  内的散射能量被探测器采样。当激光能量在望远镜入瞳上方  $h_0$  处聚焦时, 所容许的最大散射层厚度为 [16]:

$$\Delta h = 4.88\lambda h_0^2 / Dr_0 \quad (5)$$

根据 (5) 式, 对 Rayleigh 散射星来说, 它的  $\Delta h$  约  $1 \sim 2\text{km}$ 。对于钠层散射星, 其散射层的平均厚度约有  $10\text{km}$  [17], 那它的  $\Delta h$  就在  $10\text{km}$  范围内。

人造激光引导星与自然星的差异构成了激光引导星在使用中的非等晕性, 它是由两方面原因引起的, 一是激光引导星对于其上方的大气层没有进行采样; 再者从图 1 中可以看出在其采样区内引导星的激光光束也是一个光锥, 并没有在整个路径区域上采样。Rayleigh 引导星的非等晕性效应要比钠层引导星的大。投射多重激光引导星到大气层可以部分地消除非等晕性效应。对于一个自适应光学望远镜所需多重引导星的数目为 [5]:

$$N_{\text{GS}} \approx 1.58 \times 10^8 \alpha^2 D^2 / h_0^2 r_0^2 \quad (6)$$

$h_0$  是引导星在望远镜入瞳上方的高度;  $\alpha$  是一个参数, 它决定于所允许的波前误差, 例如当此误差为  $\lambda/10$  时,  $\alpha = 1.25$ 。对于一台  $2\text{m}$  级的望远镜,  $r_0 = 20\text{cm}$ , 且配置  $95\text{km}$  高度的钠层引导星, 所需的引导星数目为 3; 如果换成在  $14\text{km}$  的 Rayleigh 引导星, 则所需的引导星数目为 126。从这里也可以看出钠层引导星的优越性与现实性。

Rayleigh 引导星的优点是易于实现。许多功率为 100~200W 的激光器较容易在 10~20km 的高度产生 10 mag 级的引导星。云南天文台 1.2m 望远镜的自适应光学系统配置了半导体泵浦的 Yb:YAG 激光器以产生 Rayleigh 引导星。钠层引导星所用的较为特殊的激光器近年来也有了很大进展, 已进入了实用的阶段<sup>[18,19]</sup>。减小其非等晕性的多重激光引导星的理论已经建立<sup>[20,21]</sup>, 同时还进行了双重及三重激光引导星的试验<sup>[22,9]</sup>。

### 3 激光引导星的局限性

作为理想的情况, 期望激光引导星具有和自然星等同的性质, 那就要求引导星应该位于大气层之外, 并且相对于其它固定星体有一个已知的位置。但实际情况无法满足这些要求, 激光引导星只具备自然星的部分特性, 因而对于自适应光学的运行只提供了部分作用。激光引导星最严重的缺点是它不能提供大气畸变的倾斜信息, 再者就是由于其有限高度所产生的非等晕性效果。

#### 3.1 大气倾斜信息

从激光引导星本身不能测量出大气倾斜。这是因为当激光光束由望远镜向上传输时, 由于大气的影晌使其传输方向产生无规律的变化, 波前探测器所采样的激光斑点位置相对于望远镜光轴来说是个未知量。如果向上的激光束充满整个望远镜视场, 散射光按原方向返回, 成像在光轴上, 也就不能提供大气倾斜的信息。或者说激光引导星的光束上下往返经过大气层, 正好经历了方向相反的大气倾斜, 故波前倾斜相互抵消了。

让我们来分折失去倾斜信息时的影响。当波前平移量(该量对成像质量没有影响)去除后由于大气湍流所产生的其它波前误差的均方值为<sup>[23]</sup>:

$$\langle \phi^2 \rangle = 1.0299(D/r_0)^{5/3} \quad (7)$$

而单独由倾斜产生的为:

$$\langle \phi_T^2 \rangle = 0.896(D/r_0)^{5/3} \quad (8)$$

如果完全除去全口径的倾斜, 由高阶量产生的为:

$$\langle \phi_{HO}^2 \rangle = 0.134(D/r_0)^{5/3} \quad (9)$$

$X$  和  $Y$  方向的倾斜代表了湍流谱的 87%。很清楚, 任何自适应光学系统都应该优先进行倾斜补偿。如美国 Phillips 实验室的 1.5m 自适应望远镜上通过补偿倾斜就得到 Strehl 比(在焦面上光波的实际峰值强度与衍射极限峰值强度的比例)为 0.37(1 rad<sup>2</sup> 的畸变)的恒星像<sup>[24]</sup>。从目前情况来看, 配置激光引导星的自适应光学系统仍需要自然星来进行波前倾斜补偿。在天文观测中, 最理想的是在待测目标近处有合适的自然星。

所幸的是, 在倾斜探测与高阶波前误差探测中有若干有利于倾斜探测的因素: (1) 对于像倾斜这样的低阶湍流效应的等晕角要比其它高阶效应的等晕角大一个数量级<sup>[25]</sup>。(2) 望远镜的全口径可以用来测量倾斜, 而比全口径小得多的子孔径用来测量高阶湍流畸变, 所以用于倾斜改正的引导星的星等要比用于高阶改正引导星的星等小。假若用于倾斜改正的星等至少为 17mag, 那么自然星在银极每平方度里就有 350 个<sup>[26]</sup>。这样的星等密度相当于在每

两个等晕角里就有一个自然星,即可达到50%的天空覆盖率。如果在银道上观测,天空覆盖率可接近100%。(3)对于倾斜补偿的闭环带宽只是高阶补偿带宽的1/4左右<sup>[27]</sup>,这样就可以相应地增加其采样的积分时间。

近几年中,对于使用激光引导星时其倾斜的测定提出了一些方法,稍后加以简介。

### 3.2 非等晕性

当待测目标的光束与参考引导星的光束不相一致时就有非等晕性效应出现。有两类非等晕性对使用激光引导星的自适应光学系统是重要的:由于目标像偏离参考光束的视轴线的原由引起的角非等晕性;由于使用一个有限距离参考光束去改正一个无限远距离目标光束的原由引起的焦面非等晕性。不论是自然星或者是激光引导星,只要其位于待测目标的视场内,自适应系统的性能就仅受到焦面非等晕性的限制<sup>[28]</sup>。

有限高度的激光引导星用以评估无限远目标成像的波前畸变时会引起两种误差。首先它不能探测到高于引导星位置的大气湍流;再者,有限远距离的单个激光引导星也只是探测到从引导星到望远镜入瞳所形成的锥体中的大气湍流,这些都是焦面非等晕性效应。相对于无限远的恒星而言,非等晕性是由这些引导星的“离焦”所产生的。

由于焦面非等晕性所产生的波前探测的均方差 $\sigma_A$ 有<sup>[29]</sup>:

$$\sigma_A^2 = (D/d_0)^{5/3} \quad (10)$$

$d_0$ 定义为比例常数,其值取决于所补偿的波长、引导星的高度与天顶角、湍流的分布,其具体的数学表达式可参考文献[6]和[29]。这个理论已通过Phillips实验室1.5m自适应望远镜的试验所验证<sup>[7]</sup>,在此试验中 $d_0$ 的实测值和理论计算值均为0.39m,望远镜系统获得了0.18"(FWHM)的衍射点像,其Strehl比 $> 0.2$ 。 $d_0$ 若取所补偿的望远镜口径的2倍,这时单独由焦面非等晕性所影响的Strehl比理论上可达到约0.73<sup>[15]</sup>。闭环的激光引导星自适应系统在 $D/r_0 = 15$ 情况下已得到0.5的Strehl比<sup>[24]</sup>。对于多重激光引导星,其 $d_0$ 随多重星数目的平方根增加<sup>[6]</sup>。

钠层引导星以其较高的位置、多重引导星以及在望远镜口径所对应湍流层的采样区域大的特点,部分地克服了焦面非等晕性。

## 4 激光引导星自身倾斜测量的技术方案

从激光引导星中不能得出大气倾斜的信息以改正其效应,即天文像的摆动,这就降低了激光引导自适应光学系统在取得最大的Strehl比和天空覆盖率方面的作用。近三、四年中,从激光引导星自身信息的测量中获得大气倾斜信息的研究工作非常活跃,提出了许多解决此问题的技术方案。目前还没有对这些技术方案进行验证,其可行性还有待于进一步的实验,故以下仅对其方法加以分类并简介其基本思路。

现已提出的从激光引导星的测量中复原其大气倾斜量的技术大致可以分为以下三类:(1)差分法;这类技术的目的是将激光引导星在上升阶段所受到的大气倾斜变为零,这样激光返回阶段的大气倾斜信息就可以从测量中分离出来。它们通过对激光引导星的各种差分测量与计算来达到此目的,例如对两种不同波长激光引导星进行一系列相关角度的测量和计算<sup>[30]</sup>;或者对同一激光引导星在上升和返回两个不同时刻进行测量和计算<sup>[31]</sup>;再者是考虑到激光

引导星有一定厚度, 其光斑有延伸, 可对激光引导星光斑的不同部位进行测量和计算<sup>[32]</sup>。

(2) 统计法; 即通过统计平均的方法试图判断出激光引导星在上升阶段的倾斜分量。它们取决于对一组包含有上升阶段倾斜分量和另一些希望能被平均掉的倾斜分量的测量, 由此将上升阶段的大气倾斜分量分离出来, 进而能从整个激光引导星的测量中得到所需要的返回阶段的大气倾斜信息。平均的过程可以在望远镜的焦面或是入瞳面进行。焦面的平均方法是用一个位于主望远镜一侧的辅助望远镜去测量激光光斑的平均倾斜<sup>[33,34]</sup>, 或者用一个处于同样位置的辅助投影镜进行同样的测量<sup>[35]</sup>。对于入瞳面的平均方法, 测量由位于望远镜入瞳面的子孔径而得到<sup>[36]</sup>。

(3) 投影法; 它也是试图估计出激光光束在上升阶段所遇到的大气倾斜分量。所提出的技术原理是基于特殊的几何布置, 利用等晕角外适当位置的自然星来决定激光引导星的倾斜。具体做法是在主望远镜的旁边使用一对可移动的辅助望远镜<sup>[37,38]</sup>, 或是辅助投影镜<sup>[35]</sup>, 去测量自然星的大气倾斜分量。此对辅助望远镜或投影镜应该可以互换, 利用投影效应, 使得激光引导星和自然星定位于同一等晕角内。在辅助望远镜和主望远镜分别差分测量自然星的倾斜和激光引导星的整体, 然后估计出上升阶段激光引导星的倾斜分量, 再从整个激光引导星的测量中减去该分量就得到所需要的激光返回阶段的大气倾斜分量。

## 5 结 束 语

自适应光学和激光引导星的概念是由天文学家所提出的, 其初衷也是要应用于天文观测。利用大气后向散射产生的激光引导星提供了一种将自适应光学应用到天文暗目标观测的可行方法。激光引导的自适应光学系统是恢复受大气扰动的地基光学望远镜本来应该有的衍射极限分辨率的有力工具, 这种望远镜空间分辨率近十倍的提高展示了自适应望远镜在天文观测中应用的巨大潜力。目前配置激光引导星的自适应光学系统正在向天文应用阶段转化, 激光引导星技术中的局限性正在不断改进, 特别是将激光引导星用于大气倾斜测量的问题现在是研究的热点, 如果此问题得到解决, 那就使在 21 世纪的天文观测中广泛地运用激光引导自适应望远镜成为可能。

**致谢** 衷心感谢美国 Illinois 大学天文系的 L.Thompson 教授对作者在 Mt.Wilson 天文台 2.5m 望远镜激光引导星自适应光学项目 (UnISIS) 工作中所给予的启发性指导。

## 参 考 文 献

- 1 Ridgway S T. Proc. SPIE. 1998, 3353: 438
- 2 Beckers J M *et al.* Proc. SPIE. 1986, 628: 290
- 3 Foy R, Labeyrie A. Astron. Astrophys., 1985, 152: L29
- 4 Thompson L A, Gardner C S. Nature, 1987, 328: 229
- 5 Gardner C S, Welsh B M, Thompson L A. Proc. IEEE, 1990, 78: 1721
- 6 Fried D L. In: Fugate R Q ed. Laser Guide Star AO Workshop Proceedings, Albuquerque, NM, 1992: 37
- 7 Fugate R Q *et al.* Nature, 1991, 353: 144
- 8 Primmerman C A *et al.* Nature, 1991, 353: 141
- 9 Thompson L A, Xiong Y H. Proc. SPIE, 1995, 2534: 38
- 10 Gavel D T, Friedman H W. Proc. SPIE, 1998, 3353: 254
- 11 Friedman H W *et al.* Proc. SPIE, 1998, 3353: 260
- 12 Bonaccini D *et al.* Proc. SPIE, 1998, 3353: 356

- 13 Fried D L. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, 56: 1372
- 14 Fried D L. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 75: 52
- 15 Fugate R Q. *Current Trends in Optics*. London: Academic Press, 1994. 289
- 16 Thompson L A, Gardner C S. *Proc. SPIE*, 1989, 1114: 184
- 17 Gardner C S. *Proc. IEEE*, 1989, 77: 408
- 18 Friedmann H W *et al.* *Proc. SPIE*, 1994, 2201: 352
- 19 Max C E *et al.* *Proc. SPIE*, 1998, 3353: 277
- 20 Sandler D. In: Fugate R Q ed. *Laser Guide Star AO Workshop Proceedings*, Albuquerque, NM, 1992: 164
- 21 De La Rue I A, Ellerbroek B L. *Proc. SPIE*, 1998, 3353: 310
- 22 Neyman C R, Thompson L A. *Proc. SPIE*, 1995, 2534: 161
- 23 Noll R J. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, 66(3): 207
- 24 Fugate R Q *et al.* *J. Opt. Soc. Am.*, 1994, A11(1): 310
- 25 Vally G C. *Appl. Opt.*, 1980, 19: 574
- 26 Wolfe W L ed. *The Infrared Handbook*, Detroit, MI: Environment Research Institute of Michigan, 1978
- 27 Tyler G A. *J. Opt. Soc. Am.*, 1994, A11(1): 358
- 28 Goad L E. *Proc. SPIE*, 1991, 1542: 100
- 29 Fried D L, Belsher J F. *J. Opt. Soc. Am.*, 1994, A11(1): 277
- 30 Foy R *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1995, 111: 569
- 31 Ragazzoni R. *Ap. J.*, 1996, 465: L73
- 32 Ragazzoni R, Marchetti E. *Proc. SPIE*, 1996, 2871: 948
- 33 Belen M. *Proc. SPIE*, 1995, 2471: 289
- 34 Belen M. *Proc. SPIE*, 1997, 3126: 101
- 35 Ragazzoni R. *Astron. Astrophys.* 1997, 319: L9
- 36 Riccardi A, Esposito S, Ragazzoni R. *Proc. SPIE*, 1997, 3126: 467
- 37 Ragazzoni R, Esposito S, Marchetti E. *M. N. R. A. S.*, 1995, 276: L76
- 38 Esposito S, Ragazzoni R, Riccardi A. *Proc. SPIE*, 1997, 3126: 476

## Laser Guide Stars for Adaptive Optical Systems

Xiong Yaoheng

(*Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

### Abstract

Adaptive optical systems should satisfy some technical requirements when they are being applied to astronomical observation. One of the key issues is an enough intensity of beacon required to sample the wavefront distortions in a small isoplanatic angle for an adaptive optical system. Laser guide star, an artificial beacon, is one of the solutions for this issue. Especially for astronomical observation of a faint object, the wavefront sensor can not sample its light. In this case, the laser guide stars are very important. According to the latest progress in the world, the laser guide star technique is introduced, and emphatically for the limitations of the laser guides star. A brief introduction for the proposed possible techniques to determine the tilt of laser guide stars is also given.

**Key words** adaptive optics—laser guide stars—wavefront tilt sensing