

# 用于非完全校正自适应光学系统的人造导星

阎吉祥 周仁忠 俞 信

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

## 提 要

讨论了使用激光导星的非完全补偿自适应光学望远镜性能与导星亮度之间的关系, 给出子孔径上剩余波前误差均方根值大于  $0.10\lambda$ , 子孔径直径大于大气相关长度  $r_0$  时为产生瑞利导星和 Na 导星分别需要的激光能量。

关键词 自适应光学, 非完全校正, 激光导星。

## 1 引 言

自适应光学系统包括两个基本功能: 波前传感和波前校正。这类系统正常工作的条件是: 1) 被观察物体本身有足够的亮度为波前传感器提供适当的信号; 或者, 2) 有足够亮的导星与被观察物体处于同一等晕区内。不幸的是, 很多被观察物体附近没有足够明亮的天然导星。Foy 等人<sup>[1]</sup>于 1985 年首先建议用激光在上层大气产生人造导星, 两年后, Thompson 等<sup>[2]</sup>通过实验证明在中间钠层产生激光导星的可能性, 从而进一步发展了激光导星的概念。近期则有更多这方面的报道。

自适应光学问世以来, 人们一直关心完全补偿湍流引起的波前畸变, 上述关于人造导星的研究也都基于这一思想, 结构的复杂和价格昂贵使人们考虑所谓部分校正的可能性, 例如, 最早提出自适应光学的 Hardy 在 1991 年举行的国际光学工程学会(SPIE)年会上明确指出<sup>[3]</sup>, 当斯特列尔比(strehl ratio)为 0.5 或更小时, 仍可获得近衍射极限分辨率的像。国内近期有关实验也表明, 当子孔径直径  $d$  增大到大气相关长度  $r_0$  的 1.8 倍时, 补偿像还相当满意。这样, 为了大幅度降低自适应光学系统的成本, 使之尽早得到广泛应用, 应该对  $d > r_0$  的非完全校正进行深入研究, 本文所讨论的激光人造导星, 即是以非完全校正自适应光学系统为基础。

## 2 导星亮度

设计人造导星的最主要任务就是计算所要求的导星亮度和导星数。本文只讨论第一个问题。为此, 首先要确定所希望的自适应望远镜的性能, 这主要是孔面上剩余波前误差的均方根(rms)值  $\Delta\phi$ , Fried<sup>[4]</sup>把它表示为级数求和的形式, 并且指出, 若由波面倾斜所引起的波前误差得到完全补偿, 则子孔径上剩余波前误差(用以波长为单位的光程差表示)为

$$\Delta\phi_1 = (d/r_0)^{5/6}(\lambda/17.4). \quad (1)$$

但事实上, 倾斜误差也不可能完全校正, 补偿后残存的倾斜误差( $\Delta\phi_2$ )与传感器类型及性能有关, 例如, 对理想的哈特曼传感器, 当子孔径  $d$  大于大气相关长度  $r_0$  时, 其倾斜误差  $\Delta\phi_2$  为

$$\Delta\phi_2 = (d/r_0)(0.153\lambda\eta_c/\sqrt{N}), \quad (d > r_0) \tag{2}$$

式中  $N$  为哈特曼子孔径内的光子数;  $\eta_c$  为效率因子, 它反映探测器, 像增强器及焦面内光点大小和位置的影响, 对典型的 CCD 阵列和像增强器参数,  $\eta_c$  的取值范围为 1.35~1.50. 由 (2) 式可以看出, 要想完全校正倾斜误差, 即使  $\Delta\phi_2 \rightarrow 0$  则要求子孔径内的光子数  $N \rightarrow \infty$ . 在使用导星的情况, 它意味着要求导星的亮度是无限的, 这当然是无法实现的. 因而, 实际情况中  $\Delta\phi_2$  总是有限的. 进一步假定它与  $\Delta\phi_1$  统计独立, 并忽略波前探测与波前校正之间的时间延迟, 则倾斜校正后总的剩余均方根波前误差为

$$\Delta\phi = (\Delta\phi_1^2 + \Delta\phi_2^2)^{1/2}, \tag{3}$$

将 (1) 式、(2) 式代入 (3) 式, 得哈特曼子孔径内的光子数为

$$N = \frac{(d/r_0)^2(0.153\lambda\eta_c)^2}{\Delta\phi^2 - (d/r_0)^{5/3}(\lambda/17.4)^2}. \tag{4}$$

子孔径内所要求的光子流密度

$$F = \frac{N}{\pi(d^2/4)} = \frac{8.99\eta_c^2}{r_0^2[(17.4\Delta\phi/\lambda)^2 - (d/r_0)^{5/3}]} \tag{5}$$

由 (5) 式可以得到以下结论

**2.1 对自适应望远镜的设计者来说, 所希望的校正精度, 即允许的  $\Delta\phi$  值决定了  $(d/r_0)$**

1) 有最大允许值  $(d/r_0)_{\max}$ , 当  $(d/r_0)$  超过这一值时, 无论  $F$  取多大, 都无法实现所希望的校正精度;

2) 有最佳取值范围,  $(d/r_0)$  偏大 [当然仍小于  $(d/r_0)_{\max}$ ], 则  $F$  大, 对产生导星的激光要求过高; 偏小, 则子孔径数增多, 增加系统的复杂性.

**2.2 对自适应望远镜的使用者来说,  $d$  一定, 在一定的大气条件下  $(d/r_0)$  基本确定, 于是,  $\Delta\phi$**

1) 有最小值  $(\Delta\phi)_{\min}$ , 不能企望比这更高的校正精度;

2) 有最佳取值范围, 偏小 [当然仍大于  $(\Delta\phi)_{\min}$ ], 对导星要求高; 偏大, 不能充分利用望远镜性能.

相应于第一种情况, 图 1 给出  $F$  随  $(d/r_0)$  变化的曲线. 由图可以看出, 当  $(d/r_0)$  大于某

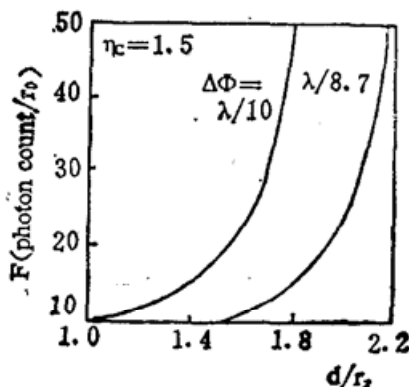


Fig. 1 Required photon flux density (photons/ $r_0^2$ ) versus  $d/r_0$

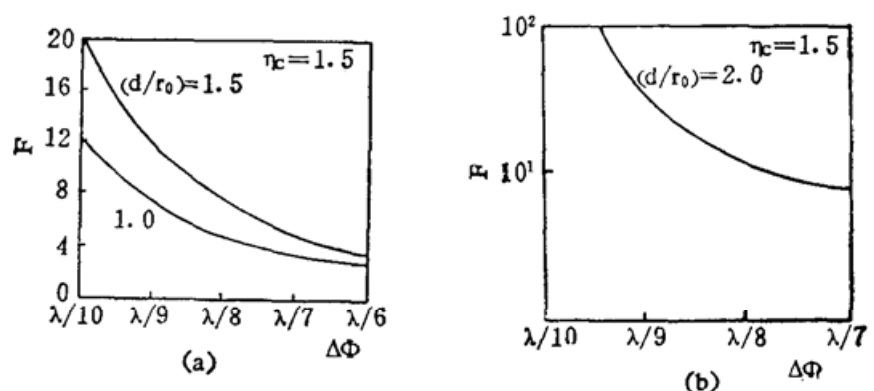


Fig. 2 Required photon flux density (photons/ $r_0^2$ ) versus the residual rms wavefront error over the aperture

一值 $(d/r_0)_c$ 时,  $F$  开始随 $(d/r_0)$ 迅速增长, 因而, 折衷考虑 $(d/r_0)$ 应取在比这一临界值 $(d/r_0)_c$ 稍小的范围内. 例如, 对  $\Delta\phi = \frac{\lambda}{10}$ , 取  $(d/r_0) \in (1.4 \sim 1.6)$ ; 对  $\Delta\phi = (\lambda/8.7)$ , 取  $(d/r_0) \in (1.7 \sim 1.9)$ .

相应于第二种情况, 图 2 给出  $F$  随  $\Delta\phi$  变化的曲线. 由图可以看出, 当  $\Delta\phi$  小于某一临界值 $(\Delta\phi)_c$ 时,  $F$  随  $\Delta\phi$  的进一步减小而迅速增大, 故  $\Delta\phi$  应确定在比 $(\Delta\phi)_c$ 稍大的范围内.

### 3 用于产生导星的激光

由上节得到的对光子流密度的要求, 可以进一步导出对所用激光之性能的要求. 产生激光导星通常有两种方式: 一种是平流层大气分子对激光束的瑞利(Rayleigh)散射; 另一种是中间层钠  $D_2$  线的共振散射. 这两种散射的机理不同, 对激光性能的要求也不同.

#### 3.1 瑞利激光导星

设激光发射孔径为  $D_p$ , 发射的激光束聚焦在望远镜入瞳上方高度为  $Z_0$ (m)处, 则所要求的激光脉冲能量  $E$  为<sup>[5]</sup>

$$E = \frac{2.58hcFD_p r_0}{\eta T_A \lambda \lambda_L \sigma_R n_R (z_0 + z_t)}, \quad (6)$$

式中  $\eta$  为望远镜和探测器的效率,  $T_A$  为单程大气透过率,  $\sigma_R$  为瑞利后向散射截面( $\text{m}^2$ ),  $z_t$  为望远镜孔径的海拔高度(m),  $n_R(z)$  为高度  $z$  处的大气密度( $\text{m}^{-3}$ ),  $E$  为每个脉冲的激光能量,  $\lambda_L$  为激光波长(m),  $\lambda$  为观察波长(m),  $h$  为普朗克常数,  $6.63 \times 10^{-34}$ (J·s),  $c$  为光速,  $3 \times 10^8$ (m/s).

由(6)式可见, 能量  $E$  正比于  $D_p$ , 所以  $D_p$  应尽可能小, 但考虑到导星位置的漂移,  $D_p$  又不能太小, 一般可取  $D_p \approx 5r_0$ ,  $\sigma_R$  与激光波长有关, 而  $n_R$  为高度的函数, 且与温度有关. 瑞利导星最佳高度  $z_0 = 12$  km, 设  $z_t = 2$  km, 则  $z = 14$  km, 以我国云南昆明地区为例, 这一高度上的平均气温约 215K, 由这些数据求出  $\sigma_R n_R = 2.3 \times 10^{-5}$ ( $\text{m}^{-1}$ ), 典型情况下,  $\eta = 0.075$ ,  $T_A = 0.4$ ,  $\lambda = 500$  nm, 于是, 所需要的激光能量可写为

$$E = 5.34 \times 10^{-5} r_0^2 F. \quad (7)$$

将(5)式代入, 并取  $\eta_c = 1.5$  得

$$E = \frac{1.08 \times 10^{-8}}{(17.4/\lambda)^2 \Delta\phi^2 - (d/r_0)^{5/3}} \quad (\text{J}). \quad (8)$$

图 3 表明,  $E$  随 $(d/r_0)$ 的变化趋势与  $F$  大致相同, 例如, 对  $\Delta\phi = (\lambda/10)$ , 当 $(d/r_0) <$

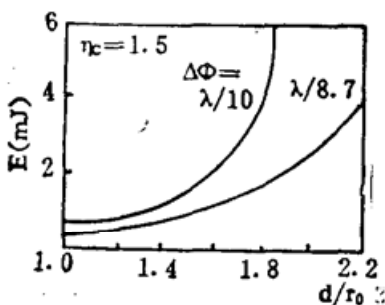


Fig. 3 Laser pulse energy requirements versus  $d/r_0$

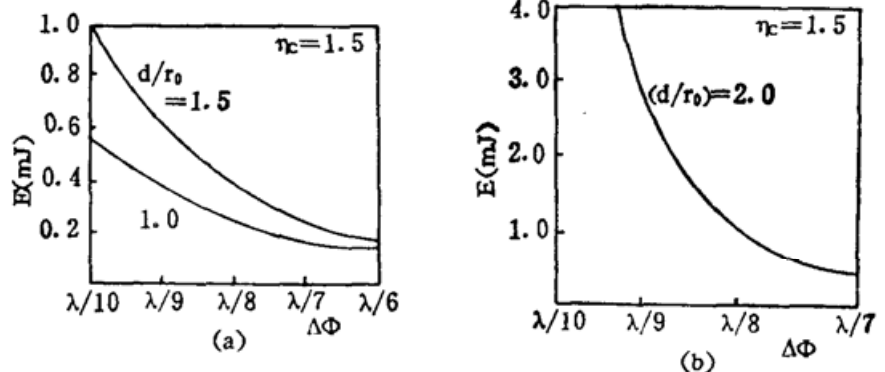


Fig. 4 Laser pulse energy requirements versus the residual rms wavefront error over the aperture

1.6 时,  $E$  增长很缓慢; 而当  $d/r_0$  从 1.7 开始继续增加时,  $E$  迅速增长, 即使  $(d/r_0)$  增加很小的量, 也会导致所要求的激光能量大幅度增加。

图 4 则表明,  $E$  随  $\Delta\phi$  的变化趋势亦与  $F$  的相同。例如, 对  $(d/r_0) \approx 2.0$ , 当要求的  $\Delta\phi$  比  $(\lambda/8.5)$  更小时,  $E$  便开始迅速增长, 而要使  $\Delta\phi < (\lambda/10)$  则是不可能的\*。

### 3.2 钠导星

为计算所要求的激光能量  $E$ , 考虑钠层后向散射, 激光能量  $E$  与光子流密度  $F$  (photon/ $m^2$ ) 的关系为<sup>[5]</sup>

$$E = \frac{4\pi z_0^2 hc F}{\eta T_A^2 C_s \sigma_t \lambda_L} \quad (9)$$

式中  $\eta$  为望远镜和探测器的效率, 7.5%;  $\sigma_t$  为钠后向散射截面,  $8.27 \times 10^{-16} m^2$ ;  $T_A$  为单程大气透过率, 0.85;  $C_s$  为钠柱丰度,  $5 \times 10^{13} m^{-2}$ ;  $z_0$  为导星在望远镜入瞳上方的高度, 92 km;  $\lambda_L$  为激光波长, 589 nm。将上面列出的典型数据及(5)式一拼代入(9)式得

$$E \approx \frac{0.32}{(17.4 \Delta\phi/\lambda)^2 - (d/r_0)^{5/3}} \text{ (mJ)}. \quad (10)$$

由文献[6]可以得知, 当要求  $\Delta\phi = 0.075\lambda$  时,  $(d/r_0)$  的最佳值为 0.9, 而总的激光能量要 30 mJ 左右 ( $D=2m$ ), 由本文的讨论可知, 当要求  $\Delta\phi = 0.111\lambda$  时,  $(d/r_0)$  取 1.9, 单个导星所需激光能量不到 0.5 mJ。对直径  $D=2m$  的望远镜, 上述条件下导星数不超过 4 个, 故总能量最多 2 mJ。

## 4 结 论

本文给出所要求的校正精度  $\Delta\phi \geq (\lambda/10)$  时望远镜子孔径直径  $d$  与大气相关长度  $r_0$  之比的最佳取值范围, 所需导星的亮度及激光能量。与文献中  $\Delta\phi < (\lambda/10)$  的结果比较, 充分说明部分校正可使望远镜系统大大简化, 所需激光能量大大降低, 因此, 合理的部分校正具有明显现实意义。

### 参 考 文 献

- [1] R. Foy, A. Labeyrie, Feasibility of adaptive with laser probe. *Ast. Astrophys.*, 1985, **152**: 129~131
- [2] L. A. Thompson, C. S. Gardner, Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy. *Nature*, 1987, **328**: 229~231
- [3] J. W. Hardy, Adaptive Optics—a progress review. *Proc. SPIE*, 1991, **1542**: 1~16
- [4] D. L. Fried, Statistics of a geometrie representation of wave front distortion. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1965, **55**: 1427~1435
- [5] C. S. Gardner *et al.*, Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois: 1. Seasonal and norturnal variations, *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 13659~13673
- [6] C. S. Gardner *et al.*, Design and Performance Analysis of Adaptive Optical Telescopes Using Laser Guige Stars. *Proc. IEEE*, 1990, **78**: 1721~1743

\* 前面说过, 由于篇幅所限, 本文未讨论导星数, 故上述结果只适合单个导星的情况, 与其它文献比较时, 必须注意这一点。

## Laser guide star used in noncompletely correcting adaptive telescope

YAN JIXIANG ZHOU RENZHONG YU XIN

(Department of Engineering Optics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

(Received 23 December 1991; revised 21 February 1992)

### Abstract

The relationship between the performance of partial compensation adaptive telescope using laser guide star and the star brightness is discussed. The laser energy requirements both for the Rayleigh guide star and the Na guide star are presented in case of the diameter of subaperture is larger than the coherence length  $r_0$  and of the residual rms wavefront error over the subaperture is larger than  $0.10\lambda$ .

**Key words** adaptive optics, partial compensation, laser guide star.

欢迎订阅 1993 年英文本

### 《OPTICAL ENGINEERING》 《OE REPORTS》

《OPTICAL ENGINEERING》和《OE REPORTS》是著名的国际光学工程学会 (SPIE) 主办的刊物。《OPTICAL ENGINEERING》创办于 1962 年, 目前向世界发行达 13000 册左右;《OE REPORTS》创办于 1984 年, 发行量达 30000 份以上。它们刊载的内容非常广泛, 包括光学、光电子学和激光工程理论、应用技术和仪器、设备等方面研究成果和信息报道, 对世界各国的光学专家瞭望全球光学界的动态具有十分重要的意义, 也是我国光学专家了解世界光学工程界的研究发展动态的重要窗口。

SPIE 总部设在美国, 它在世界许多国家设立分部。中国光学学会与其建立了合作关系, 发展了共同的会员 SPIE/COS, 成立了 SPIE/COS 执行委员会和秘书处, 秘书处设在中国光学学会国际部内。因此, 中国光学学会获得了 SPIE 正式许可: “在中国境内发行上述两刊物”。刊物由美国按时寄来原版。北京印刷, 质量保证。从 1993 年开始, 我们热烈欢迎全国各大图书馆、大专院校, 科研和事业单位订阅。

《OPTICAL ENGINEERING》每月一期, 每期约 210 页 (特大 16 开) 定价 46 元。《OE REPORTS》月报, 每份大 4 开 6 张, 定价 8 元。两种刊物全年分别为 12 期, 共计价 648 元 (只相当于直接向美国订阅价的 1/3)。欲订购者请速向中国光学学会国际部索要征订单。

联系地址: 北京市学院南路 86 号, 中国光学学会国际部, 邮编: 100080。电话: 8318877-473

中国光学学会国际部

一九九二年十二月