

部分校正自适应光学系统的激光导星阵*

阎吉祥 周仁忠 俞 信

(北京理工大学工程光学系, 北京, 100081)

摘要: 讨论了斯特列尔 (Strehl) 比为0.5的部分校正自适应光学望远镜所需要的人造导星数对望远镜口径及大气相关长度 r_0 的依赖以及子孔径大于 r_0 时对导星亮度的要求, 最后给出在相应条件下产生钠导星所需要的激光能量。

Laser guide stars for adaptive optical system with partial correction

Yan Jixiang, Zhou Renzhong, Yu Xin

(Beijing Institute of Technology)

Abstract: In this article, the number of the artificial guide stars and the brightness of the guide stars used in the partial-correction adaptive optical system with 0.5 Strehl rate (or 0.13 residual rms wavefront error over the subaperture) have been presented. Comparing to the correspondent results of the conventional system, we find that the partial correction system is simple and easy to realize.

一、引言

大气湍流引起的随机相位起伏严重地限制大型地基天文望远镜的分辨率, 在好的能见度条件下, 可见光波长的分辨率的典型值只有 1rad/s 左右, 采用具有波前补偿能力的自适应光学技术, 可使这种状况得到明显改善, 实现近衍射极限的成象质量。

自适应光学系统由两个基本部分组成: 波前传感器和波前校正器。波前传感器的功能是探测望远镜瞳面上畸变的波前, 它正常工作的条件是每个子孔径内部都要有一定的光子流, 当待成象物体本身亮度微弱时, 就需要在同一等晕区内有足够明亮的参考星存在。遗憾的是, 由于大气等晕角很小, 天然导星远不能覆盖整个天空, 很多被观察物体本身没有足够的亮度, 也没有足够明亮的导星在侧。弗依 (Foy) 等人^[1]于1985年最先建议用激光在上层大气产生人造导星。由于激光可以向任意方向发射, 所以, 人造星原则上能够覆盖整个天空。两年以后, 汤普森 (Thompson) 等人^[2]在两个方面发展了这一概念, 他们一方面计算了产生人造导星的关键工程参数, 另一方面, 于当年1月21日晚在夏威夷 Mauna Kea 光学站上空中间钠层首次成功地产生出人造导星。最近几年, 人造导星问题已成为自适应光学中一个十分活跃的研究领域。

*本工作为国家自然科学基金资助项目。

对自适应光学的兴趣主要在于用它补偿大气湍流引起的波前畸变,追求完善校正所导致的结构复杂和价格昂贵迫使人们开始参考部分校正的可能性。最早提出自适应光学的哈迪(Hardy)在国际光学工程学会(SPIE)1991年会上建议将激光发射自适应光学系统和天文成象自适应光学系统区别对待,并且指出,对后一种应用,当斯特列尔比为0.5或更小时,仍可获得近衍射极限分辨率的象。本文的目的就是要讨论部分校正自适应光学系统性能与导星数及导星亮度的关系,将它与文献报导的传统系统对导星的要求相比较,可以看出用于部分校正系统的导星要容易实现得多。

二、斯特列尔比和均方根波前误差

斯特列尔比(S)是由德国学者斯特列尔研究点源成象时于1902年首先引入的,它定义为畸变波前与未畸变波前峰值强度之比。对于较小的波前畸变, S 与以波长为单位的相位差 $\Delta\varphi$ 之间的关系可以用

$$S = \exp[-(2\pi\Delta\varphi/\lambda)^2] \quad (1)$$

近似。当波前畸变严重时, S 与 $\Delta\varphi$ 之间没有简单的关系,但是,只要 $S \geq 0.3$,便有^[3,4] $[1 - (S/S_0)] \times 100\% \leq 10\%$ 成立。式中, S_0 为斯特列尔比的精确值。本文拟讨论 $S \approx 0.5$ 的情况,因而,用方程(1)求得的 S 与理论值的百分比误差在10%以内。将 $S = 0.5$ 代入(1)式得到

$$\Delta\varphi \approx 0.13\lambda$$

这就是孔径上相应的rms波前差值。

三、部分校正系统所需人造导星数

设大气等晕角为 $\theta_{i,p}$,导星离望远镜瞳面高为 h ,则一颗导星在望远镜孔径上的覆盖区直径定义为(见附图)

$$D_{i,p} = 2h_p\theta_{i,p} \quad (2)$$

用 D_0 表示只需一颗导星的望远镜最大孔径,并记为

$$D_0 = D_{i,p}/\alpha = 2h_p\theta_{i,p}/\alpha \quad (3)$$

式中, α 取决于孔面上最大允许的rms剩余波前差,并与大气模式有关。这里考虑两种模式,一种是假定大气湍流只出现在高度为 h_t 的一薄层中,简称为单薄层模型;另一种是由哈夫纳哥(Hufnagel)假定的模型,即

$$C_n^2(h) = 2.2 \times 10^{-23} h^{1.0} e^{-h} + 10^{-16} e^{-h/1.5}$$

对 $\Delta\varphi = 0.13\lambda$,与第一种模型相应的 α 为0.7左右,与第二种相应的 α 约0.8^[5]。此外,符合前一种的湍流大气等晕角

$$\theta_{i,p} \approx r_0/3h_t$$

而符合后一种模型的大气等晕角

$$\theta_{i,p} \approx 4 \times 10^{-5} r_0$$

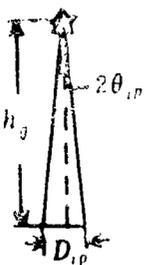


Fig. The area covered with the starlight on a cross section of the telescope aperture

其中弗雷德常数 m 为单位,而 $\theta_{i,p}$ 的量纲则为rad,假定单薄层模型中湍流出现的高度为 $h_t = 10\text{km}$,将上述结果代入方程

(3), 对两种模型分别得到

$$D_0 = (20/21) \times 10^{-4} h_0 r_0$$

和

$$D_0 = 1 \times 10^{-4} h_0 r_0$$

而总口径为 D 的望远镜所需的导星数

$$N_g = D^2/D_0^2$$

则分别为

$$N_g = (20D/21h_0r_0)^2 \times 10^8 \quad (4)$$

和

$$N_g = (D/h_0r_0)^2 \times 10^8 \quad (5)$$

比较方程 (4) 和方程 (5) 可以看出, 对两种不同的大气模型 (但需假定 r_0 相等), 相同口径的望远镜要求的导星数相差不大。所以, 下面的讨论仅以方程 (5) 为例, 并设 $r_0 = 0.20\text{m}$ 。

到目前为止, 最有可能用作导星的是由钠 D_2 线的谐振散射和低空大气的瑞利散射产生的。典型高度分别为 92km 和 12km 。连同 r_0 的值一同代入方程 (5), 对 $D = 2\text{m}$ 的望远镜得到导星数为 1.2 和 67。对于 $D = 4\text{m}$ 的望远镜则得 5 和 268。文献 [4] 对 $\alpha = 1.25$ ($\Delta\varphi \leq \lambda/10$) 给出的相应结果依次为 3, 171, 12 和 685。由此可见, 部分校正所要求的导星数大为减少, 因而远较传统系统易于实现。

四、部分校正系统对导星亮度的要求

在不久前的一篇论文中^[6], 作者们讨论了圆孔系统对导星的亮度要求。这里将给出对方孔系统适用的关系, 同时将那里的主要结果列出以便比较。

对导星亮度的要求也取决于所希望的自适应光学望远镜的性能, 即校正后孔面上剩余波前误差的均方根值 $\Delta\varphi$ 。它可以被看成由两部分组成, 一部分由波面倾斜引起, 另一部分是除波面倾斜外的其余波前误差。用以波长为单位的光程差表示, 直径或边长为 d 的孔面上后一部分误差为

$$\Delta\varphi_1 = (d/r_0)^{5/6} (\lambda/17.4) \quad (6)$$

自适应光学系统主要校正第一部分, 即波面倾斜误差, 校正后残存的倾斜误差为

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\psi d/4 \quad (7)$$

而校正后孔径上的总波前差为

$$\Delta\varphi = (\Delta\varphi_1^2 + \Delta\varphi_2^2)^{1/2} \quad (8)$$

式中, $\Delta\psi$ 为波前斜率的测量精度, 它与传感器的类型及性能有关, 并取决于信号光子流密度 N 。对哈特曼传感器, 当 $d > r_0$ 时,

$$\Delta\psi = 0.61\lambda\eta_c / (\sqrt{Nr_0}) \quad (9)$$

而当 $d \leq r_0$ 时还与孔的形状有关, 对圆孔

$$\Delta\psi = 0.61\lambda\eta_c / (\sqrt{Nd})$$

而对于方孔有

$$\Delta\psi = 0.52\lambda\eta_c / (\sqrt{Nd})$$

式中, N 是单哈特曼孔中的总光子流, 而 η_c 是由系统的不完善决定的因子, 典型值是 1.35~1.50。将这些 $\Delta\psi$ 代入方程 (7) 得到

$$\Delta\psi = \begin{cases} (0.15\lambda\eta_c/\sqrt{N})(d/r_0) & d > r_0 \\ 0.15\lambda\eta_c/\sqrt{N} & \text{圆孔} \\ 0.13\lambda\eta_c/\sqrt{N} & \text{方孔} \end{cases} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} d \leq r_0$$

对于部分校正系统,感兴趣的主要是 $d > r_0$ 的情况,于是

$$\Delta\varphi = \left[(d/r_0)^{5/3} (\lambda/17.4)^2 + (d/r_0)^2 (0.15\lambda\eta_c/\sqrt{N})^2 \right]$$

$$\text{或} \quad N = (0.15^2 \lambda^2 \eta_c^2 d^2 / r_0^2) \left[\Delta\varphi^2 - (d/r_0)^{5/3} (\lambda/17.4)^2 \right]^{-1}$$

对圆孔,光子流密度

$$F = 8.99\eta_c^2 / \{ r_0^2 \left[(1.74\Delta\varphi/\lambda)^2 - (d/r_0)^{5/3} \right] \} \quad (10)$$

而对方孔

$$F = 7.06\eta_c^2 / \{ r_0^2 \left[(1.74\Delta\varphi/\lambda)^2 - (d/r_0)^{5/3} \right] \} \quad (11)$$

再次假定 $\Delta\varphi = 0.13\lambda$,由文献〔7〕, d/r_0 的最佳值约为2,取 $r_0 = 0.20\text{m}$, $\eta_c = 1.35$,得到 $F = 8.4/r_0^2$ (对圆孔)和 $F = 6.6/r_0^2$ (对方孔)。而根据上述文献,对 $\Delta\varphi = \lambda/15$,光子流密度为 $38.7/r_0^2$ 。

五、激光能量

以钠导星为例, N_0 个导星所需激光总能量为〔7〕

$$E = (4\pi h_0^2 hc / \eta T_A^2 C_s \sigma_t \lambda_L) N_0 F \quad (12)$$

式中, η 为望远镜和探测器的效率,7.5%; σ_t 为钠共振散射截面, $8.27 \times 10^{-16}\text{m}^2$; T_A 为单程大气透射率,0.85; C_s 为钠柱丰度, $5 \times 10^{-12}\text{m}^{-2}$; h_0 为导星在望远镜上方的高度,92km; λ_L 为激光波长,589nm; h 为普朗克常数, $6.63 \times 10^{-34}(\text{J}\cdot\text{s})$; c 为光速, $3 \times 10^8\text{m/s}$ 。将上述典型数据及已经求出的光子流密度代入方程(12)可得,产生单颗导星所需激光能量对圆孔为0.14mJ,而对方孔为0.11mJ。由第三节的讨论可知,对口径为2m和4m的望远镜,本文所考虑的部分校正条件下所需的导星数分别为1.2和15。因而,产生这些导星所需的激光总能量对圆孔分别为0.17mJ和0.70mJ,对方孔分别为0.13mJ和0.55mJ。对其它条件相同但 $\Delta\varphi = \lambda/1.75$ 的情况,文献〔7〕给出直径为2m和4m的圆口径望远镜所需产生导星的激光能量分别为144mJ和576mJ。

六、结 论

对斯特列尔比 $S = 0.5$ (相当于孔径上剩余波前误差为 0.13λ)的自适应光学成像系统,给出所要求的导星数和导星亮度对大气条件、望远镜孔径及导星高度的依赖关系。根据这些关系式就一些典型数据进行计算,并将所得结果与有关文献给出的“完善”校正的相应值进行比较,表明所需的导星数明显减少,要求的光子流密度急剧下降,与二者的乘积成正比的产生导星的激光能量则更是大大降低。这意味着合理的部分校正能极大地简化系统,从而将自适应光学向着实用化推进一步。

参 考 文 献

- 〔1〕 Foy R, Labeyrie A. *Astronomy & Astrophys.* 1985; 152: 129~131
- 〔2〕 Thompson I. A, Gardner C S. *Nature*, 1987; 328: 229~231