

用于瑞利激光导引星的激光器能量要求与分析*

许冰** 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所 成都 610209)

【摘要】 对激光导引星技术的原理进行了阐述,根据测量到的532 nm波长大气后向散射特性参数,用激光雷达方程计算了瑞利激光导引星对532 nm波长激光器能量在各高度上的要求。

关键词 激光导引星; 大气后向散射; 自适应光学

中图分类号 TN249

自适应光学技术是利用来自光路的光波误差信号,通过对其探测和控制,实现补偿环境因素对光学系统的不利影响,使系统始终工作在近理论极限水平的光学反馈控制技术。

长期以来,困扰自适应光学应用的主要问题之一是要有合适的信标,即要在自适应光学系统补偿或校正的光路中提供整个光路像差(或称误差)的信号。为使该技术能广泛应用于各个光学领域,针对不同的应用,人们探索各种不同的信标工作方式。在天文观测和光在大气中传输补偿等领域,除了用亮目标本身作信标外,还提出用激光导引星作信标的概念^{1~4)},解除了自适应光学系统只能应用亮目标作信标的限制,大大地扩展了它的实用空间。下面将阐述其原理,并就瑞利激光导引星对激光器能量的要求给出计算结果。

1 激光导引星工作原理

激光导引星的工作原理是将一束激光发射到要补偿的大气光路中,利用大气层中的分子、原子和气溶胶等粒子对光产生的后向散射,在返回的途中携带有所需光路像差信息的特点,通过自适应光学系统的波面探测器测量出所需的误差信号,使自适应光学系统可以闭环工作,实现对大气湍流等环境因素对光学系统造成的不利影响的补偿,如图1所示。通常激光导引星需要同时满足等晕条件和强度条件^[1]。

等晕条件描述的是激光导引星在多大程度上代表系统光路的像差信息,即两者共光路的程度。对天文观测用的激光导引星有两种非等晕性影响这一特性。一种为观测目标与导引星角度偏差引起的非角度等晕性,可以通过减少其夹角来降低它的影响;另一种为有限的导引星高度对无限远目标的聚焦非等晕性,只能通过提高导引星高度来减少其影响。

强度条件是对信标亮度的要求,即自适应光学系统要达到一定的补偿精度,信标必须有一定的亮度。在理想的光子噪声极限情况下,校正精度要优于十分之一波长,则自适应光学系统波面探测器的每个子孔径,在每个采样周期中至少需有100个光电子。

由激光雷达方程可知,当发射出一束能量为 $E(J)$ 的激光,在大气层高度 $z(m)$ 上,收集 $\Delta z(m)$ 厚度中的散射光电子数 N 为

$$N = A_r \eta \Delta z \lambda E B(z, \lambda) / z^2 hc \quad (1)$$

式中 A_r 为接收系统的探测面积(m^2); η 为发射和接收光学系统的总效率,含探测器的光电转换量子效率; λ 为发射激光波长(m); $B(z, \lambda)$ 为在高度 z 处对波长 λ 光的大气后向散射特性参数($m^{-1}Sr^{-1}$),反映

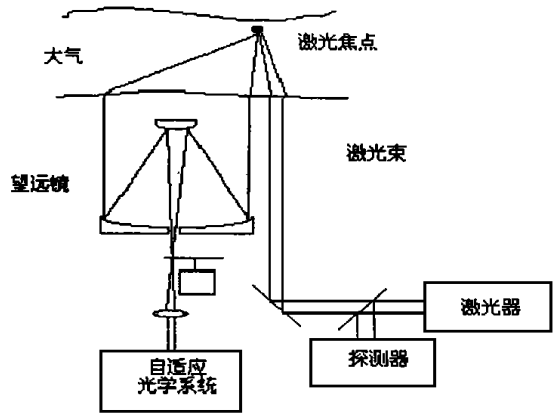


图1 激光导引星原理示意图

1999年4月14日收稿

* 国家高技术计划激光技术领域资助项目

** 男 39岁 在职博士 副研究员

大气透过率和散射的共同贡献; h 为普朗克常数; c 为光速。一般来讲, 激光导引星用的激光器是脉冲激光器, 以便探测器区别导引星产生的高度。

由不同的散射机理产生的后向散射光, 其 $B(z, \lambda)$ 是不同的, 由式(1)可知, 选择大的大气后向散射特性参数, 可以降低对激光导引星中激光器和探测器的要求, 减小工程实施的难度。目前, 利用低层大气的各种散射产生的瑞利导引星和用高层大气中钠原子的共振散射产生的钠导引星是公认的可实现的导引星技术, 其中瑞利导引星相对较容易实现, 也是研究激光导引星技术的首选突破口。

1 瑞利激光导引星对激光器能量要求

从原理上讲, 瑞利激光导引星对激光器的要求较为简单, 由于不存在象钠导引星那样的增加激光能量, 会使散射光最终达到饱和的现象, 在波长、谱线宽度、脉冲宽度、形状和能量等激光器参数的选择上不必象钠导引星那样对全部参数同时进行严格要求^[1], 而只要重点选择其中的两三个参量, 如重复率, 波长和激光能量。重复率的要求是由自适应光学系统校正大气湍流的动态特性决定的, 最小重复率应在 100 Hz 以上。这样, 在现有技术条件下, 如何用最小的激光能量产生既高又亮的激光导引星就成为激光波长选择和能量要求的主要标准。由式(1)可得所需激光器的能量为

$$E = Nz^2 hc / A_r \eta \Delta z \lambda B(z, \lambda) \quad (2)$$

可以看到它与自适应光学系统探测器的有效探测面积, 系统效率和大气特性等许多因素有关。

根据 C. S. Gardner 等人的分析, 对瑞利激光导引星, 激光波长越短, 其瑞利散射截面越大, 再综合考虑大气透过率和探测器转换效率等因数的影响, 激光波长选择在 500 nm 附近是比较理想的, 也是目前国外实验系统常采用的激光器^[2-9], 因此, 为研究我国的瑞利激光导引星, 我们对 532 nm 波长的后向散射特性参数进行了测量, 并与 Elterman 模型进行了比较, 图 2 是其典型结果。图中由‘+’构成的曲线是用 Elterman 模型给出的, 下面一条曲线是用一组较低数据拟合的, 其天气

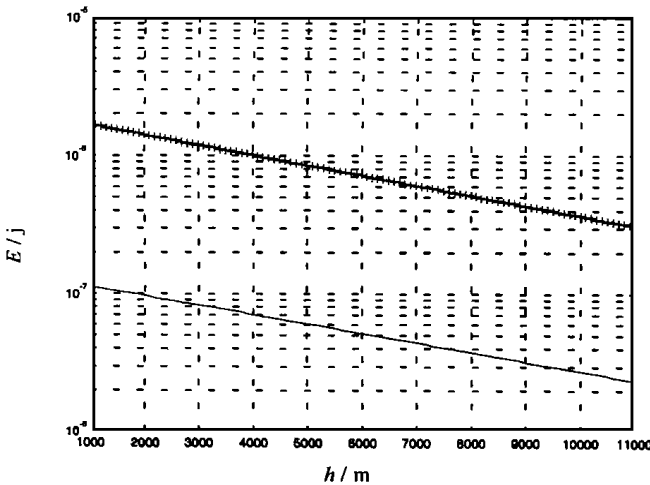


图 2 大气后向散射特性参数随高度的变化
‘+’为 Elterman 模型曲线, 另一条是实测曲线。

条件为可进行天文观测天气, 其他时间测量的数据和在不同地方得到的结果均在这两条曲线之间^[7]。这样, 由这两条曲线, 从式(2)计算出的所需激光能量较能代表我国的实际情况。

作为一个实例, 根据目前自适应光学望远镜的技术水平, 计算了对 532 nm 波长激光器的脉冲能量要求, 见图 3。它是在子孔径为 0.1 m, $\eta=0.02$, $N=100$ 光电子, $\Delta z=1\ 000$ m 情况下, 针对图 2 中大气后向散射特性参数 B 的两条典型曲线, 计算在各高度上对激光能量的要求。‘+’曲线对应的是 Elterman 模型能量随高度的变化。由图可看出当激光脉冲能量为 0.1 J 时, 瑞利导引星的最高高度可达到 10 km 左右。

3 结论

激光导引星技术是关系到自适应光学技术能否在天文等领域进一步拓宽视野的关键技术之一, 有瑞利激光导引星和钠共振激光导引星两种可能的技术。从对激光器的要求来看, 前者相对较松。激光器能量是限制激光导引星高度的最主要因素, 在现有的技术条件下, 100 Hz 重复率, 0.1 J 脉冲能量的 532 nm 波长激光器可达到的信标高度在 10 km 左右。

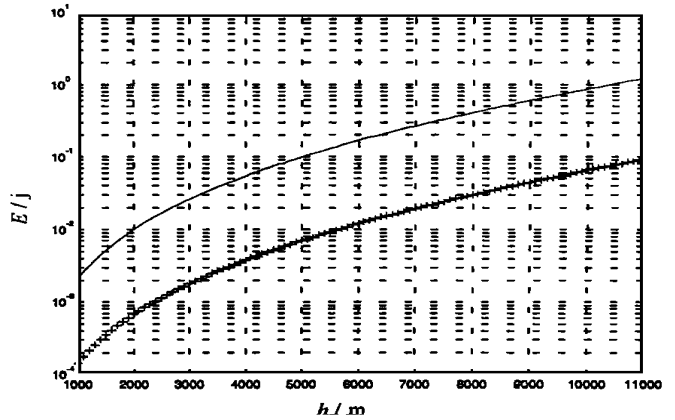


图3 所需激光能量随高度的变化

‘+’曲线为用 Elterman 模型计算得到的, 另一条是实测曲线

参 考 文 献

- 1 Gardner C S. Design and performance analysis of adaptive optical telescopes using laser guide stars. *Proceeding of the IEEE*, 1990 78(11): 1721~1743
- 2 Primmerman C A. Compensation of atmospheric optical distortion using a synthetic beacon. *Nature*, 1991, (353): 141
- 3 Fugate R Q. Measurement of atmospheric wavefront distortion using scattered light from a laser guide star. *Nature*, 1991, (353): 144
- 4 Humphreys R A. Atmospheric-turbulence measurements using a synthetic beacon in the mesospheric sodium layer. *Optics Letters* 1991, 16(18): 1367
- 5 Fugate R Q. Two generations of laser-guide-star adaptive-optics experiments at the starfire optical Range. *J Opt Soc Am A*, 1994 11(1): 310~324
- 6 McCullough P R. Photoevaporating stellar envelopes observed with Rayleigh beacon adaptive optics. *Astrophysical Journal*, 1995, (438): 394~403
- 7 许冰, 李明全, 邹春民, 张强, 等. 对云南天文台低层大气后向散射特性的测量与分析. *光电工程*, 1998, 25(6): 37~40

Analysis of Laser Energy Requirement for Rayleigh Laser Guide Star

Xu Bing Jiang Wenhan

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences Chengdu 610209)

Abstract In this paper, a brief describe of Laser guide star principle is given at first. The requirement of the 532nm laser energy is calculated with radar equation according to the back-scattering characters measured by Nd:YAG laser.

Keywords Laser guide star; atmospheric back-scattering; adaptive optics