

文章编号: 1001-3806(2004)06-0613-03

## 星载自适应光学系统的双导星信标理论研究

管保柱, 陈海清, 叶嘉雄, 程鹏辉  
(华中科技大学 光电子工程系, 武汉 430074)

**摘要:** 星载相机的波前畸变主要来源于两个部分: 由于温度场、重力场变化引起的相机光学系统自畸变; 由于大气湍流引起的波前误差。为获得高分辨率的图像, 需要校正波前误差。提出一种对星载光学系统波前畸变进行有效探测的技术。星载激光器分时产生钠导星和瑞利导星, 前者用于校正自畸变, 后者用于校正大气湍流造成的波面像差。针对该方法对激光能量的要求, 建立了双导星信标系统的数值模型, 并进行仿真。结果表明, 该方法对激光器的要求, 在目前是可以实现的。该方法可以用于空间相机光学系统的波面畸变探测, 从而为星载自适应光学的进一步研究提供依据。

**关键词:** 自适应光学; 钠导星; 瑞利导星; 空间相机

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

### Model of beacon used in the air-borne adaptive optical system

GUAN Baor-zhu, CHEN Hai-qing, YE Jia-xiong, CHENG Peng-hui  
(Department of Optoelectronics Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Artificial beacon is a key issue of adaptive optical systems. For the air-borne optical systems, artificial beacon is used to sample the wavefront distortion which is mainly caused by the atmospheric turbulence and the change of gravity field and temperature field. A kind of beacon composed of both Rayleigh and sodium guide stars is presented to detect the wave-front. A numerical model is discussed. The corresponding simulation result is given. It is found that the adaptive optics based on the beacon composed of the two kinds of laser guide stars are feasible for the wave-front detection of air-borne optics.

**Key words:** adaptive optics; Na laser guide star; Rayleigh laser guide star; air-borne camera

## 引 言

自适应光学技术在天文学观测、激光传输等领域有着广阔的应用前景。其中, 基于激光导星的自适应地基望远镜在天文领域取得许多有意义的成果<sup>[1]</sup>。自适应光学技术在地基系统的成功应用、自适应光学系统的微小型化、集成化技术的发展以及激光器技术的发展<sup>[2,3]</sup>, 使星载自适应光学技术成为现实。星载相机受空间环境及相机内环境的影响难以获得理想的成像质量。主要影响来源于大气湍流, 以及相机内部重力场、温度场的变化<sup>[4]</sup>。星载自适应光学技术可用于校正这些影响造成的误差, 从而获得近衍射极限的分辨率。

星载自适应光学系统的信标系统同样可由人造

激光导星实现。该信标系统主要作用是利用激光导星的信标光获取波前畸变信息。星载系统的特点使星载自适应光学系统的信标选择不完全同于地基系统。提出一种星载激光器分时产生钠导星和瑞利导星的信标技术, 分别校正相机光学系统自畸变和大气湍流造成的波面像差。

## 1 双导星信标实现波前探测的原理

实际的星载相机存在以下几方面的自畸变误差: 星载相机光学部件的设计、加工、安装和调试引入的静态误差; 空间的微重力环境变化、卫星发射时的过载和冲击振动造成的光学零件形变; 卫星内部设备发热、空间的辐射热量等造成的光学部件形变和位移。

针对自畸变误差, 可以采用自适应光学系统进行校正。基本原理如下: 星载激光器发出一束基准光, 入射大气的钠原子富集层。激光器工作波长调节在钠原子的  $D_2$  线上, 引起钠原子的谐振散射, 其

作者简介: 管保柱(1979-), 男, 硕士, 现主要从事自适应光学、光电信号处理方面的研究工作。

E-mail: bzguan@sina.com

收稿日期: 2003-11-13; 收到修改稿日期: 2004-03-09

中进入相机入瞳的后向散射光近似平行光。该光束通过相机光学系统,经微变形镜反射进入波前探测器。探测器获得畸变信息,信号处理器处理信息。处理结果经控制器推动变形镜,实现波前误差校正。

自畸变校正的关键是获得标准平行光。钠导星距地约 100km,该高度以下未采样的湍流层对信标光无影响。钠导星高度以上大气湍流极其微弱,对信标光的影响非常小,可以忽略不予考虑。钠导星距离卫星一般为 200km 以上,可以认为相机接受孔径接收到的为标准平行光。

大气湍流造成的相位误差,由基于瑞利导星的自适应光学系统实现校正。在地基自适应光学系统中,瑞利导星信标有明显的缺点:存在较严重的聚焦非等晕性;需要多颗导星等。而钠导星可以克服上述问题。因此在地基自适应光学系统中,钠导星技术代表着人造信标的主要方向。对于星载自适应光学系统,瑞利导星则优于钠导星:(1)星载自适应光学系统在大气层上方,瑞利导星距地数公里,距地面被测目标很近,可以较大限度地采样大气湍流引起的相位噪声,因此聚焦非等晕性误差较小;(2)自适应光学系统所需导星数与信标距自适应光学系统的距离成反比。所以对于星载自适应光学系统而言,导星距地距离越小,所需导星数越少。

综上所述,完成自畸变误差和大气湍流扰动误差的校正分别需要钠导星和瑞利导星。其中,钠导星的高度是确定的,典型值为 92km。瑞利导星应距地较近,以携带低层大气造成的位相扰动信息并获得足够强的瑞利散射信号。可以设定瑞利导星高度在 3km 左右。

星载自适应光学系统结构见图 1。星载激光器发出激光入射大气。瑞利散射波在钠谐振散射波之

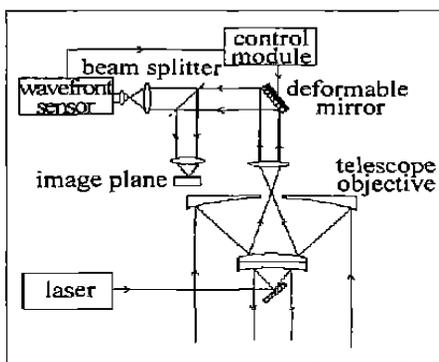


Fig. 1 Air-borne adaptive telescope system diagram

后到达波前探测器。瑞利散射波和钠谐振散射波具有与入射辐射相同的波长,因而用对该波长敏感的另一探测器通过时间选通分别获取来自两类导星的

信息。两次获得的波前畸变信息分别处理,校正量叠加,推动微变形镜实现校正。

## 2 导星共用的信标数值模型及仿真

产生激光钠导星,要求星载激光器的工作波长设定为 589.2nm。对瑞利导星,激光器工作波长越短,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 500nm~600nm 范围比较理想。因此,为实现瑞利导星与钠导星共用的信标方案,设定 589.2nm 为激光器的工作波长。

设大气等晕角为  $\theta$ ,瑞利导星距离星载望远镜瞳面高为  $H$ 。则一颗瑞利导星在望远镜孔径上的覆盖区直径为  $D_i$ :  $D_i = 2H\theta$  (1)  
当最大允许剩余波前误差(RMS)为  $\Delta\psi$ 时,一颗导星覆盖区直径  $D_0$  则为:  $D_0 = D_i/\alpha = 2H\theta/\alpha$  (2)  
式中,  $\alpha$  为一个与大气模式及  $\Delta\psi$  有关的系数,典型值为 1.25。

星载望远镜总口径为  $D$  时,需要瑞利导星数  $N$  为:  $N = D^2/D_0^2 = (\alpha D/2H\theta)^2$  (3)  
较好大气条件下,  $\theta = 0.8 \times 10^{-5}$  rad;设卫星高度为 250km,星载望远镜总口径为 1.5m,则对于瑞利导星,  $N = 0.22$ 。故设置一个瑞利导星即可。忽略大气湍流对钠导星信标光的影响,不必考虑大气等晕角的限制,仅需设置一个激光钠导星。

对于瑞利导星,需要考察聚焦非等晕误差的大小,以考察使用瑞利导星的可行性。设进入星载望远镜入瞳的地面物体发射光近似为平行入射光,导星发出的信标光则与该平行光存在一个锥形重叠区。因此,实际上信标光采样的大气仅为该锥形重叠区。该区以外部分的大气湍流即引起了聚焦非等晕误差。

针对星载系统,修正文献[5]中的聚焦非等晕方差公式,则导星下方和导星到卫星间的湍流所引起的聚焦非等晕方差  $\sigma_{low}^2$  和  $\sigma_{up}^2$  分别为:

$$\sigma_{low}^2 = 0.057 D^{5/3} K^2 \int_0^Z C_n^2(h) dh \quad (4)$$

$$\sigma_{up}^2 = D^{5/3} K^2 \left[ 0.50 \frac{\mu_{5/3}}{H_g^{5/3}} - 0.45 \frac{\mu_2}{H_g^2} \right] \quad (5)$$

式中,  $\mu_m = \int_0^H h^m C_n^2(h) dh$ ;  $D$  为望远镜接受孔径,  $K$  为导星激光的波数,  $Z$  为瑞利导星距地高度,  $H_g$  为卫星距地高度;  $C_n^2$  为高度  $h$  处的湍流强度分布:

$$C_n^2(h) = C_0 h^{-2/3} e^{-h/H_c} \quad (6)$$

式中,  $C_0$  为距地 1m 高度的湍流强度;  $H_c$  为标尺高度, 介于 2.5km~6.5km 之间, 具体数值依赖当地的地理环境和当时的天气情形。

聚焦非等晕方差  $\sigma^2$  为:

$$\sigma^2 = \sigma_{up}^2 + \sigma_{low}^2 \quad (7)$$

设定  $D = 1.0m$ ,  $Z = 3km$ ,  $H_g = 250km$ ,  $H_c = 5km$ 。由 (4) 式和 (5) 式得  $\sigma_{up}^2$  和  $\sigma_{low}^2$  分别为 1.4159 和 0.5205。将上述数值代入 (7) 式, 可得瑞利导星的聚焦非等晕方差  $\sigma^2 = 1.9364$ 。可见, 以瑞利导星发出光作为信标光, 有较小的聚焦非等晕误差。

考察两类激光导星共用方案可行性的重要一环是考察两类导星对星载激光器的要求。

由 Hartmann 探测器允许的校正后波前误差 (RMS) 确定探测器一个子孔径所需接受到的光子数目  $N$  为<sup>[6]</sup>:

$$N = \frac{0.372 \lambda^2 \eta_{CD}^2}{\Delta \Psi^2 d^2} \quad (8)$$

式中,  $\Delta \Psi$  为波前探测器允许波前误差 (RMS),  $d$  为子孔径尺寸,  $\eta_{CD}$  为由探测器决定的效率因子。探测器接受到的光子流密度  $F$ :

$$F = 4N/\pi d^2 \quad (9)$$

产生瑞利激光引导星所需要的每个脉冲的激光能量  $E_R$  为<sup>[6]</sup>:

$$E_R = \frac{12.87 F r_0^2 hc}{\eta T_a^2 \lambda^2 \sigma_R n_R(Z_g)} \quad (10)$$

式中,  $r_0$  为大气相干长度,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $\eta$  为相机总的光学效率,  $T_a$  为大气传输效率,  $\lambda$  为激光器工作波长,  $\sigma_R$  为瑞利后向散射截面积,  $n_R(z)$  为距地  $z$  高度处的大气密度,  $Z_g$  为瑞利导星距地距离。

产生钠导星, 则要求钠层后向散射提供上述光子流密度  $F$ , 需要的激光器脉冲能量  $E_{Na}$  为<sup>[6]</sup>:

$$E_{Na} = \frac{12.57 F Z_h^2 hc}{\eta T_a^2 \lambda C_s \sigma_s} \quad (11)$$

式中,  $Z_h$  为激光器距离钠层的高度,  $C_s$  为钠丰度,  $\sigma_s$  为钠离子后向散射面积。

将 (8) 式, (9) 式分别代入 (10) 式和 (11) 式, 分别可得:

$$E_R = \frac{6.1 r_0^2 \eta_{CD}^2 hc}{\eta T_a^2 d^4 \Delta \Psi^2 \sigma_R n_R(Z_g)} \quad (12)$$

$$E_{Na} = \frac{5.96 \lambda \eta_{CD}^2 Z_h^2 c}{\eta T_a^2 d^4 \Delta \Psi^2 C_s \sigma_s} \quad (13)$$

主要考虑脉冲能量  $E$  与  $Z_h$ ,  $\Delta \Psi$  及  $d$  的关系。考虑卫星高度一般比较确定, 故主要模拟在确定  $Z_h$  情况下 (此处设定卫星距地高度为 300km),  $E$  与  $\Delta \Psi$  及  $d$  的关系。由上述数值模型进行数值计算, 可得

图 2 和图 3, 由图可见, 激光脉冲能量  $E$  随着  $\Delta \Psi$  和  $d$  的增大明显减小。

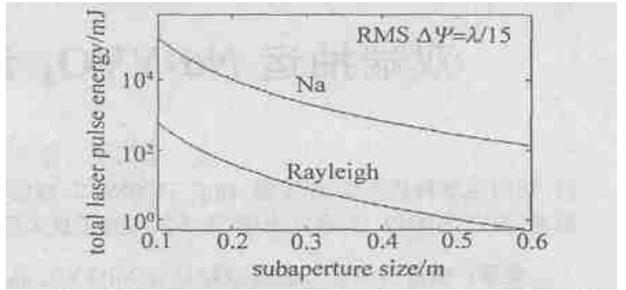


Fig. 2 Total laser pulse energy requirements versus the subaperture size

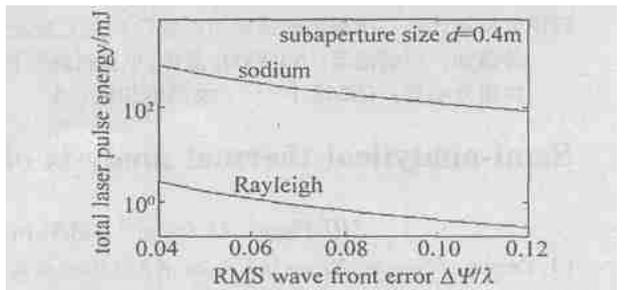


Fig. 3 Total laser pulse energy requirements versus the residual rms wave front error over aperture

由上述数值模拟可见, 对于星载自适应光学系统, 两类导星共用的信标方法是可行的: (1) 聚焦非等晕误差较小, 瑞利导星可以较好地实现大气湍流扰动误差的采样; (2) 钠导星无需考虑等晕角限制, 只需一颗导星, 而瑞利导星距星载望远镜远, 数值模拟表明只需一颗瑞利导星, 因此, 从导星数上考虑, 该方法简单易行; (3) 导星共用方法对激光能量的要求在数百毫焦范围之内, 因此, 激光器有较大的选择余地, 可以充分考虑空间条件和钠导星对激光器提出的其它要求; (4) 从时序上考虑, 设卫星高度为 300km, 激光从发射到钠富集层位置并返回的时间约为 1ms。激光从发射到瑞利导星并返回的时间为 1.6ms, 则探测钠层散射信号和瑞利散射信号应分别从激光发射后 1ms 和 1.6ms 开始。其时间间隔足以满足探测门宽和处理器时间的要求。

### 3 结 论

地基自适应光学系统已经获得了广泛应用, 其相关技术也渐趋成熟。星载自适应光学系统可以直接移植很多地基系统的技术, 但也有其自身特征, 理论模型也不完全相同。人造激光导星的设置是星载自适应光学系统设置的重要一环。确立其理论模型, 考察其实际可行性对星载自适应光学技术的发展有一定意义。

针对星载光学系统的自畸变误差和大气湍流扰

(下转第 624 页)

滴的产生、薄膜的均匀性、薄膜的结晶状态以及沉积速率等,同时,还需要对含有各种掺杂剂和共掺杂剂的 ZnS 的发光机理及其内部结构作进一步深入研究。

ZnS 荧光薄膜在高亮度、高分辨率的显示器如场发射以及平板显示中具有潜在的应用前景而受到人们的重视。更值得提出的是,由于量子尺寸的纳米颗粒及其掺杂具有独特的光电特性,因此 PLD 制备纳米 ZnS 薄膜有可能提高其发光效率,改进其发光性能,并实现 ZnS 基纳米发光材料的全色化,这有可能成为今后 ZnS 发光材料的一个重要研究方向。

### 参考文献

- [1] 雷士湛. 创造奇迹的光——21 世纪的激光技术 [M]. 北京: 科技文献出版社, 1995. 43.
- [2] 吴锦雷, 吴全德. 几种新型的薄膜材料 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1999. 244~262.
- [3] VALKONEN M P, LINDROOS S, RESCH R. Growth of zinc sulfide thin films on (100) Si with the successive ionic layer adsorption and reaction method studied by atomic force microscopy [J]. Appl Surf Sci, 1998, 136: 131~136.
- [4] PRETE P, LOVERGINE N, MAZZER M *et al.* Diethyldisulphide as sulphur precursor for the low temperature metalorganic vapour-phase epitaxy of ZnS: growth, morphology and cathodoluminescence results [J]. J Crystal Growth, 1999, 204: 29~34.
- [5] KITA R, HASE T, SASAKI M *et al.* Epitaxial growth of CuO thin films by in situ oxidation of Cu thin films [J]. J Crystal Growth, 1991, 115: 752~757.
- [6] SHINOYA S, YEN W M. Phosphor handbook [M]. Boca, Raton, Boston, London, New York, Washington D C: CRC Press, 1999. 137.
- [7] 肖志国. 蓄光型发光材料及其制品 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 21.
- [8] 里耳 N, 奥特 H. 硫化锌发光体的结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1965. 8.
- [9] 贾冬冬, 吴伯群, 刘玉龙. ZnS 型荧光粉的粒度、形貌和荧光发射谱的研究 [J]. 光散射学报, 2000, 12(3): 150~154.
- [10] 叶云霞, 王大承, 张永康. 脉冲激光沉积制备薄膜的研究动态 [J]. 江苏理工大学学报(自然科学版), 2001, 22(2): 56~59.

- [11] 许华平, 辛火平, 郑立荣. 高导电性 BaRuO<sub>3</sub> 薄膜及其脉冲激光沉积 [J]. 中国激光, 1996, 23(1): 80~84.
- [12] MCLAUGHLIN M, SAKEEK H F, MAGUIRE P *et al.* Properties of ZnS thin films prepared by 248nm pulsed laser deposition [J]. A P L, 1993, 63(14): 1865~1867.
- [13] HILLIE K T, CURREN C, SWART H C. ZnS thin films grown on Si (100) by XeCl pulsed laser ablation [J]. Appl Surf Sci, 2001, 177: 73~77.
- [14] STRUM K, FAHLER S, KREBS H U. Pulsed laser deposition of metals in low pressure inert gas [J]. Appl Surf Sci, 2000, 154/155: 462~466.
- [15] YEUNG K M, TSANG W S, MAK C L *et al.* Optical studies of ZnS: Mn films grown by pulsed laser deposition [J]. A P L, 2002, 192(7): 3636~3640.
- [16] HIRANATSU H, OHTA H, HIRANO M *et al.* Heteroepitaxial growth of single-phase zinc blende ZnS films on transparent substrates by pulsed laser deposition under H<sub>2</sub>S atmosphere [J]. Solid State Communication, 2002, 124: 411~415.
- [17] YOO Y Z, CHIKYOW T, AHNET P *et al.* Comparison of hexagonal ZnS film properties on c- and a-sapphires [J]. J Crystal Growth, 2002, 237~239: 1594~1598.
- [18] YOO Y Z, IN ZH W, CHIKYOW T. S doping in ZnO film by supplying ZnS species with pulsed-laser-deposition method [J]. A P L, 2002, 81(20): 3798~3800.
- [19] GEOHEGAN D B. Pulsed laser deposition of thin films [M]. New York: Wiley, 1994. 115.
- [20] 周岳亮. 脉冲激光沉积高温超导薄膜 [J]. 物理, 1998, 27(3): 167~173.
- [21] SHEN W P, KWOK H S. Crystalline phases of II-VI compound semiconductors grown by pulsed laser deposition [J]. A P L, 1994, 65(17): 2162~2165.
- [22] SPEMANN D, VOGT J, BUTZ OPPERMAN T D *et al.* Ion beam analysis of Zn<sub>2-x</sub>Cu<sub>x</sub>In<sub>2</sub>S<sub>2</sub> films [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physica Research, 2002, B190: 667~672.
- [23] WAGNER G, LANGE U, BENITE K *et al.* Structural properties of thin Zn<sub>0.62</sub>Cu<sub>0.19</sub>In<sub>0.19</sub>S alloy films grown on Si(111) substrates by pulsed laser deposition [J]. Thin Solid Films, 2000, 358: 80~85.
- [24] 冯钟潮, 赵岩, 鍾志源. 脉冲激光溅射沉积 PZT 膜 [J]. 应用激光, 1999, 19(5): 262~264.
- [25] 敖育红, 胡少六, 龙华 *et al.* 脉冲激光沉积薄膜技术研究新进展 [J]. 激光技术, 2003, 27(5): 453~456.

(上接第 615 页)

动误差的自适应校正系统,提出一种基于钠导星与瑞利导星共用的信标方案。通过对导星共用系统数值模型的仿真,在理论上初步论证该方案的可行性。仿真实验表明,使用现有哈特曼传感器做波前探测,对激光器的要求在可行范围之内。基于导星共用方案的自适应光学系统可以探测并校正温度场、重力场以及大气湍流引起的波前畸变。

### 参考文献

- [1] FUGATE R Q, FRIED D L. Measurement of atmospheric wavefront dis-

ortion using scattered light from a laser guide star [J]. Nature, 1991, 353: 144~146.

- [2] LAWRENCE E S, MARTIN L B. Hartmann sensors detect optical fabrication errors [J]. Laser Focus World, 1996, 32(4): 111~117.
- [3] VDOVIN G, MIDDELHOEK S, SARRO P M. Technology and applications of micromachined silicon adaptive mirrors [J]. Opt Engng, 1997, 36(5): 1382~1390.
- [4] 张志伟, 马骏, 俞信. 微小型自适应光学系统及其在星载光学遥感器上的应用 [J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1): 49~52.
- [5] 阎吉祥, 俞信. 自适应光学人造钠导星对激光能量的要求 [J]. 北京理工大学学报, 1996, 16(6): 617~620.
- [6] GARDNER C S, WELSH B M, THOMPSON L A. Design and performance analysis of adaptive optical telescopes using laser guide stars [J]. Proc IEEE, 1990, 78(11): 1721~1743.