

人造导星技术及导星用激光系统*

阎吉祥 俞 信

(北京理工大学, 北京, 100081)

摘要: 论述了自适应光学系统对人造导星的需要; 简单介绍了两类激光导星; 重点描述了钠激光导星的产生机理及可用于钠激光导星的一些激光系统。

关键词: 自适应光学 瑞利激光导星 钠激光导星

Artificial guide star and related laser system

Yan Jixiang, Yu Xin

(Beijing Institute of Technology)

Abstract: The requirement of adaptive optical system to artificial guide star is discussed and two kinds of laser guide star have been introduced briefly. In this paper, the mechanism of sodium laser guide star and laser systems used in this guide star are emphasized.

Key words: adaptive optics Rayleigh laser guide star sodium laser guide star

一、引 言

自适应光学的效果在实验室和野外都经过反复实验验证。毫无疑问,用地基天文望远镜可以得到很好的补偿的象,条件是测量目标足够亮,以便能在一个观察周期内向望远镜的每一子孔径提供数百个光电子。典型条件下,这相当于 $1 \times 10^7 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ 的入射光子流密度,如果是对可见光进行观察,则相当于 7 等星,倘若目标本身比 7 等星弱,则要求在其附近(同一等晕区内)有足够明亮的参考信标。遗憾的是,很多实际感兴趣的星体本身不够亮,也没有足够明亮的天然参考星在侧,因而就需要在其周围布置一颗或数颗人造参考星,对导星进行探测,将结果用于目标象的补偿。

用高能激光照射天空,将散射光作为人造参考信标的激光导星技术于 1982 年首先提出,稍后开始实施的一项计划,旨在研究采用人造信标的自适应光学理论以及装置性能的改善,林肯(Lincoln)实验室^[1]和菲利普(Phillips)实验室^[2]首先报导了有关用激光导星作参考信标的实验数据。

在天文界,独立的研究结果于 1985 年首次公开报导^[3],最近几年,这一研究领域的文献大量涌现^[4-7],特别是今年年初出版的美国光学学会会刊(J O S A(A))第 1,2 两卷上,有十几篇长篇文章集中讨论这一问题。

二、两类激光导星

早期的人造导星方案依赖于空气中氮或氧的后向瑞利(Rayleigh)或喇曼(Raman)散射,即

* 国家自然科学基金资助。

所谓瑞利导星,这种导星的优点是其所需的激光器比较容易制造;但它有两个明显的缺点:(1)由于大部分空气处于地球表面上方 10km 以内的高度层,返回信号的点源也在相同高度范围。这样,来自瑞利散射的后向散射波将明显地不同于大气顶部理想参考源产生的波,弗雷德(Fried)称此问题为聚焦非等晕性。如果由更高的大气层来产生后向散射,则回波可用于探测高层湍流。不幸的是,大气密度随高度迅速减小,高层大气瑞利散射返回信号太弱,要想得到足够强的信号,要求极高的激光功率,这是非常困难的。(2)在张角相同的情况下,一颗低空导星的覆盖区比一颗高空导星的覆盖区小得多,或者说,为得到相同校正区,前者所需导星数比后者多得多,由于上述原因,瑞利导星渐渐不作为研究重点。

另一类导星技术依赖于 90~100km 高处的钠层对照射激光的共振散射,并称为钠激光导星。很显然,它可以克服瑞利导星所面临的困难,而其缺点是对激光的性能有些特殊要求,随着激光技术的发展,这一问题逐步趋于解决,因此,钠导星技术代表当前人造信标的主要发展方向,也是本文下面将讨论的重点。

三、钠导星产生机理

钠原子最强的谐振散射是波长分别为 589.2nm 和 589.6nm 的 D_2 线和 D_1 线,相应的跃迁分别为 $3^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$ 和 $3^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{1/2}$ (如图 1 所示)。

对调谐在 D_2 线中心并垂直向上传播的激光束,约有 $\xi=6\%$ 的光子被吸收,于是,有相应数量的钠原子由 $3^2S_{1/2}$ 态激励到 $3^2P_{3/2}$ 态。这些原子返回 $3^2S_{1/2}$ 态并发射光的自然寿命 τ_n 的典型值为十几个 ns;而在 90km 的高度上,钠原子与空气分子(主要是氮分子)相邻两次碰撞的时间间隔 τ_c 则长达一百多 μs ,因而,后者对 τ_n 基本没有影响。这就是说,可以认为由钠原子散射的光子数等于被其吸收的激光光子数。设每个激光脉冲发射的光子数为 N ,则由钠原子散射的光子数为 $N\xi$ 。假定散射是各向同性的,则在地面处接收散射光子的面密度为

$$\Delta N_1 = \frac{N\xi}{\pi H^2}$$

式中, H 为钠层的高度,而在直径为 d 的圆域内接收到的光子数则为

$$\Delta N = N\xi \frac{d^2}{4H^2} \quad (1)$$

如果接收信噪比由光子计数统计决定,并假定电压信噪比为 R ,则

$$\sqrt{\eta \Delta N} = R \quad (2)$$

式中, η 为光探测器的量子效率。

将(1)式代入(2)式,给出每个脉冲的光子数

$$N = \frac{4H^2 R^2}{\xi \eta d^2} \quad (3)$$

或每个脉冲的总能量应为

$$E = \frac{4H^2 R^2}{\xi \eta d^2} h\nu \quad (4)$$

需要指出的是,在得到方程(4)的过程中,假定散射光是各向同性的,然而事实上,沿前向和后向的散射要比其他方向的更强些。因此,为达到一定信噪比所要求的光子数或激光能量

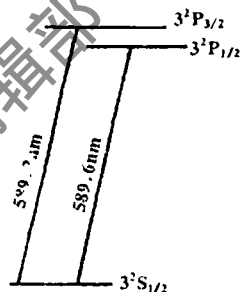


Fig. 1 Transitions of sodium in the upper atmosphere

会更小些。

四、可用于导星的激光系统

这里介绍几种计划用于,或已经用于,或有可能用作自适应光学望远镜人造导星的激光系统。

1. Keck 望远镜系统

以威廉·凯克(William Keck)命名的 Keck 望远镜是由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)计划建造的大型天文望远镜。该计划分为四个阶段,耗资 943 百万美元的 Keck I 已于 1993 年 3 月在 W. Keck 观察站首次用于科学观测,并收到良好的效果;Keck II 计划于 1996 年完成;从第三阶段开始,Keck 望远镜上将安装钠激光导星系统,LLNL 考虑了以下三种可能方案:

(1)CW 运转环形染料激光器。用 25W 氩离子激光泵浦,单纵模输出 2W。

(2)CW 运转驻波染料激光器。由 25W 氩离子激光泵浦,同时激励 2 至 3 个纵模,总输出功率 5W。

(3)脉冲工作染料激光器。系统工作在主振-放大模式,由腔内倍频的 Nd:YAG 激光泵浦,输出与大气钠层线宽为 2GHz 的 D_2 谱线匹配,通过增加功放级数可使平均功率达到数十乃至数百瓦。下面将对这类系统作比较详细的描述。

2. 用于人造导星的脉冲染料激光系统

这里介绍的钠导星激光系统,是由 LLNL 的研究人员设计制造的,用它作参考源的自适应光学系统,已在 Lick 观察站的望远镜上进行了试验,结果表明,在中等大气能见度条件下,如果校正系统具有足够的驱动单元数和带宽,则可使直径为 3m 的望远镜系统斯特列尔(Strehl)比达到 0.5 左右。

该系统所用染料激光器由两个倍频 Nd:YAG 激光泵浦,原理性框图如图 2 所示。其中虚线框内表示望远镜室,为了避免大量余热影响望远镜性能,泵浦光源和染料激光主振级(DMO)安置在另一房间,只有染料激光的放大级与望远镜在一起。

Nd:YAG 激光器各由两部分组成,一部分是电源和调 Q 控制单元,另一部分是激光头。每个激光器消耗约 8kW 的功率,大量余热由冷却水带走。每个激光头有三根光纤输出,其中一根接同室的 DMO,另外两根则分别引向前置放大级和功率放大级。

DMO 单元包括染料激光腔,模式和频率选择元件及相位调制器。DMO 的输出通过光纤馈给染料前置放大器,后者是与 DMO 相同的染料盒,但不含任何频率控制装置。来自 DMO 的几个毫瓦的激光在这里被放大几百毫瓦,并耦合到功率放大级,后者可输出 25W 激光。如果希望得到百瓦量级的激光输出,则需再加一级染料放大。

导星的输出望远镜由一些负透镜和发射透镜组成,对于主望远镜来说,前者在很大程度上相当一个瞄准镜。

3. 用于钠导星的固体激光

本小节介绍一种可产生钠激光导星的固体激光系统。这项工作是由麻省理工学院林肯实

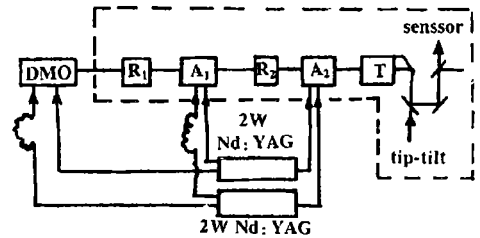


Fig. 2 Block diagram for the dye laser system
A₁ - preamplifier A₂ - power amplifier
R - relay optics T - telescope

实验室的几位研究人员报导的^[8]。

适当调谐的两个 Nd:YAG 的和频恰好可与钠 D₂ 线的发射波长谐振。这两个 YAG 激光器分别运转在 1.06μm 和 1.32μm, 所得到的钠谐振源与染料激光系统相比有一些明显的优点: 体积小, 更容易调节, 可靠性好, 输出高峰值功率等。此外, 和频可以通过调谐注入种籽二极管激光进行微调。

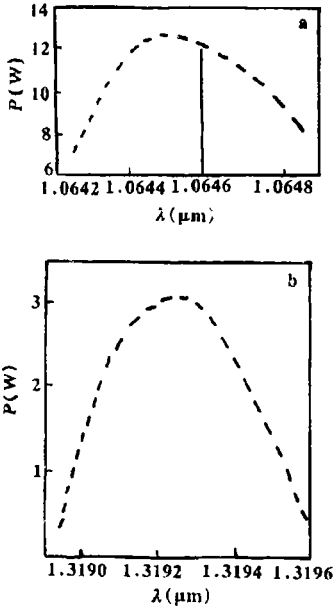


Fig. 4 Tuning curves of the CW 1.06μm and 1.32μm Nd:YAG lasers

瑞利散射的结果, 而 600μs 处的峰则相应于钠层的后向谐振散射。

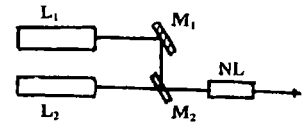


Fig. 3 Schematic of the laser system for sum frequency generation of sodium resonance radiation L₁ - 1.06μm YAG L₂ - 1.32μm YAG NL - nonlinear crystal

钠谐振辐射和频的原理性简图如图 3 所示。两个 Nd:YAG 激光器的输出通过二色镜共轴传播, 并聚焦到非线性晶体 LiNbO₃ 上, 晶体中产生的和频辐射直接进入钠蒸气盒。两个 Nd:YAG 激光发射由腔内可倾斜标准具调谐, 调谐曲线如图 4 所示, 当它们调谐到中心附近(1.0646μm 和 1.3192μm)时, 便可产生钠谐振辐射(0.5892μm)。

上述光源用于观察地球钠层的谐振荧光, 散射光用望远镜收集, 并通过干涉滤波器和偏振器减小背景光, 然后由光电倍增管探测。多通道计数器记录的光电倍增管读数是钠谐振辐射向大气发射后所经历时间的函数。图 5 是由地球上空大气层返回的信号, 较早的信号是大气

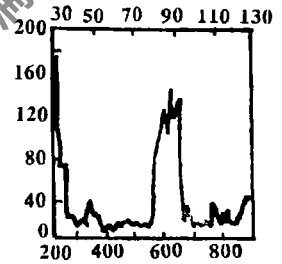


Fig. 5 Sodium resonance radiation backscattered by the earth's atmosphere

参 考 文 献

- 1 Primmerman C A. Nature, 1991;353:141~143
- 2 Fugate R Q, Fried D L, Ameer G A et al. Nature, 1991;353:144~146
- 3 Foy R, Labeyrie A. Astronomy & Astrophys, 1985;152:129~131
- 4 阎吉祥, 周仁忠, 俞信. 激光技术, 1993;17:65~69
- 5 Parenti R R, Sasiela R J. J O S A, 1994;(11);288~309
- 6 Friedman H, Erbert G, Kuklo T et al. SPIE, 1994;2201;352~363
- 7 Happer W. J O S A, 1994;A(11);263~276
- 8 Jeys T H, Brailove A A, Mcoradian A. Appl Opt, 1989;28:2588~2591

作者简介: 阎吉祥, 男, 1946 年 12 月出生。副教授, 北京理工大学中青年学术带头人, 纽约科学院(NYAS)国际成员, 国际工程光学学会(SPIE)会员。现从事自适应光学、光电统计学、激光理论、技术和应用的研究与教学。

俞 信, 男, 1941 年出生。教授, 博士生导师, 北京理工大学副校长, 美国光学学会会员(OSA)。现从事自适应光学、微弱信号光电检测等研究。