

钠信标测光理论与实验研究

晋凯^{1,2,9}, 魏凯^{1,2}, 李敏^{1,2}, 程锋^{1,2}, 薄勇³, 左军卫³, 姚吉³, 卞奇^{3,9}, 冯麓⁴, 薛向辉⁵,
程学武⁶, 钱仙妹⁷, Angel Otarola⁸, 张雨东^{1,2}

1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;
2. 中国科学院光电技术研究所 自适应光学研究室, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 4. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;
5. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 6. 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071;
7. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;
8. 三十米望远镜天文台, 美国 帕萨迪纳 91107; 9. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 钠信标激光器与钠原子间的耦合效率是其性能评价的核心指标之一, 为对钠信标激光器的激发效率实现精确测量, 在云南丽江 1.8 m 望远镜上搭建了一套完整的激光钠信标测光系统, 该系统由钠信标激光器、激光中继光路和激光发射望远镜、钠信标接收望远镜、钠原子激光雷达、大气视宁度测量仪等组成。自 2011 年以来利用该系统对中国科学院理化技术研究所 20 W 级百微秒脉冲激光器所产生的钠信标进行了相应的测量标定, 成功得到了半高全宽最小为 3' (对应到 90 km 高度处为 1.3 m) 的钠信标图像, 并测量了在不同的出光功率、偏振状态和中心波长下钠信标的回光结果。实验中分析了滤光片、CCD 量子效率曲线等在对钠信标测光时的影响, 对所产生的钠信标回波光光子数进行了精确标定, 并提出了一种钠信标 V 星等的计算方法; 在 19 W 出光功率, 圆偏光状态下获得了最亮的钠信标, 其在大气层上空的光子数流量为 $9.55 \times 10^6 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 对应 7.4 V 星等。

关键词: 自适应光学; 钠信标; 回波光光子数

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0106005

Theoretical and experimental study on photometry of a sodium laser guide star

Jin Kai^{1,2,9}, Wei Kai^{1,2}, Li Min^{1,2}, Cheng Feng^{1,2}, Bo Yong³, Zuo Junwei³, Yao Ji³, Bian Qi^{3,9},
Feng Lu⁴, Xue Xianghui⁵, Cheng Xuewu⁶, Qian Xianmei⁷, Angel Otarola⁸, Zhang Yudong^{1,2}

1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
5. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
6. Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
7. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-08-03

作者简介: 晋凯(1990-), 男, 博士生, 主要从事钠信标自适应光学系统方面的研究。Email: hijk1990@live.com

导师简介: 魏凯(1981-), 男, 研究员, 主要从事大口径地基望远镜方面的研究。Email: wei_kai@126.com

8. Thirty Meter Telescope Observatory, Pasadena, CA. 91107, USA;
9. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Coupling efficiency between the sodium laser and sodium atoms in the mesosphere is one of the most important parameters for the sodium laser guide star system. A photometry system of the sodium beacon had been built on the 1.8-meter telescope at Lijiang Observatory, Yunnan Province, to measure the brightness of the beacon and coupling efficiency of the laser. The system consisted several parts: sodium laser, beam transfer optics and laser launch telescope, receiver telescope, atmospheric coherence length measuring instrument, and ground-based sodium lidar. Measurements of the sodium beacon on different output power, polarization status and central wavelength, excited by the 20 W class quasi-continuous wave sodium laser of Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences had been carried out Since 2011. The apparent full width with half maximum of the beacon spot could be as small as 3', or 1.3 meter at 90 km altitude. Detail of calculating the returned photons had been presented. Taking into account the transmission through astronomical V-band filter and quantum efficiency of the CCD camera, the corrected brightness of the sodium beacon produced by 19 Watts of circular polarized light was equivalent to a 7.4-V-magnitude natural star, or $9.55 \times 10^6 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ on the top of the atmosphere.

Key words: adaptive optics; sodium laser guide star; returned photons

0 引言

自适应光学系统是现代大型地基天文望远镜的重要组成部分之一,可用于校正由大气湍流造成的望远镜成像分辨率及成像质量的下降^[1]。自适应光学系统中波前探测器的工作需要产生信标光的导引星同时满足两个条件:(1)导引星与被观察目标处于同一等晕区内;(2)导引星需有足够的亮度以满足波前探测信号的需求^[2]。受于上述条件的限制,使得采用自然导星自适应光学系统的观测覆盖率很小,在近红外波段成像的覆盖率不足 1%^[2],这严重限制了自适应光学的使用范围。而人造激光导引星(或人造信标)的使用,使得天文观测中自适应光学系统的天空覆盖率有了很大的提高^[3-5]。产生人造信标的方法有两种,一种是利用大气平流层中气体分子的后向瑞利散射,称为瑞利信标,受大气密度随高度指数下降的影响,其高度一般不会超过 30 km;另一种则是利用大气中间层约 90~110 km 高度钠原子的共振散射,称为钠信标。钠信标由于其更高的高度,其波前探测引入的聚焦非等晕误差较瑞利信标更小,因而更适合大口径地基天文望远镜^[2]。

相比于瑞利信标,钠信标的激发产生对激光器

的要求更为苛刻。受钠原子 D₂ 线吸收谱线宽度及吸收饱和效应等影响,钠信标激光器对其中心波长、频谱分布、频谱宽度、脉冲形式等有着严格的要求^[6]。早期的钠信标激光器多采用染料激光器^[7-8],其采用技术相对简单,但对钠原子的激发效率较低,且其日常维护成本较高^[9]。随着激光技术的发展,全固态和频激光器^[10-14]和光纤拉曼钠信标激光器^[15-18]也相继研制并使用,其较染料激光器有着更高的激发效率和更低的维护成本^[9]。国际上已有的大口径地基天文望远镜在升级其钠信标自适应光学系统时,对其采用的钠信标激光器有着更加严格的要求,也使得染料钠信标激光器逐步被全固态和频激光器和光纤拉曼钠信标激光器所取代。

然而,各体制类型的激光由于其光学参数的不同,对钠原子的激发效率也不尽相同,自 20 世纪 90 年代以来国外已有多篇文献报道了对不同体制钠信标激光器激发效率的仿真^[19-24]及实验测量^[25-28]结果。由于国内对钠信标的研究起步较晚,近几年才有对钠信标回光测量实验结果的有关报道。中国科学院光电技术研究所介绍了对中国科学院理化技术研究所 20 W 级钠信标激光器原型机的测试结果,实验中成功观测到圆偏光较线偏光带来的回波光子数的提高^[29];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报

道了其脉冲激光器激发产生的钠信标测光标定结果,并详述了其采用的测光方法^[30];中国工程物理研究院应用电子学研究所介绍了其长脉冲钠信标激光器激发信标回光特性的测试结果^[31],实验验证了采用其长脉冲钠信标激光器避免饱和效应、得到高亮度钠信标的可行性。然而,激发效率即单位能量的激光对单位密度的钠原子激发产生的光子数,作为评价钠信标激光器性能指标的核心参数之一,在上述的文献中皆未提及。由于缺少对大气透过率、钠原子柱密度及分布的同步测量,上述文献中无法对激光器的激发效率进行量化分析,也使得各实验之间的结果无法相互比较。因而,搭建一套系统用于测量激光器的激发效率和标定钠信标的回光亮度,对于激光器性能的优化分析和后端钠信标自适应光学系统的仿真模拟,都必不可少。

中国科学院理化技术研究所自 2002 年开展对钠信标激光器的研发以来,已成功研发了若干代钠信标激光器试验样机,并受到国际上 30 m 望远镜项目的关注作为其参选的钠信标激光器之一^[32]。文中介绍了自 2011 年以来,中国科学院光电技术研究所联合中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院武汉数学物理研究所、中国科学技术大学、中国科学院云南天文台、中国科学院国家天文台等多家单位,对中国科学院理化技术研究所 20 W 级百微秒脉冲激光器所产生的钠信标进行相关测试的结果。实验中搭建了一套完整的钠信标测光系统,成功观测到半高全宽最小 3' 的钠信标图像。实验中根据实际观测系统的相关参数,给出了对信标回光亮度进行标定的方法,测量了不同的激发条件下钠信标的回光亮度;同时,结合钠层激光雷达所测的钠层柱密度及钠原子分布,及大气透过率等测量结果,给出了该钠信标激光器对钠原子的激发效率。

1 钠信标测光系统简介

钠信标测光系统由钠信标激光器、激光传输光路及激光发射望远镜、信标回光测量系统、大气相干长度测量仪、钠原子激光雷达等组成。

钠信标激光器由中国科学院理化技术研究所提供,其第二代 20 W 级百微秒脉冲钠信标激光器采用了腔外和频的方案,1 064 nm 与 1 319 nm 种子光源采用了环形行波腔结构,并用标准具压窄其线宽,经

过主振-功率放大等系统后,在三硼酸锂(LBO)晶体内对两路输出激光实现和频,经过优化后最终获得的和频 589 nm 的激光在实验室条件下平均功率可达 33 W^[14]。钠信标激光器具体参数见表 1。

表 1 中国科学院理化技术研究所 20 W 级百微秒脉冲钠信标激光器主要参数

Tab.1 Main parameters of TIPC 20 W microseconds-pulse sodium laser

Parameters	Value
Maximum output power	33 W
Laser wavelength	Tunable on sodium D ₂ line
Laser linewidth	<0.4 GHz
Laser frequency stability	±0.3 GHz
Laser repetition frequency	500-800 Hz tunable
Laser pulse length	~120 μs
Laser beam quality	M ² -1.25

激光传输光路由若干块保偏反射镜组成,将激光光束由激光头导入至激光发射望远镜入瞳处,经激光发射望远镜扩束放大后向天顶方向发射。为了将钠原子在 90 km 附近的共振散射信号与高度较低的瑞利散射信号区分开,激光发射与接收端采用分孔径工作模式。在分孔径工作模式下,发射望远镜与接收望远镜的光轴间距越大,接收望远镜的成像中,钠信标的共振散射信号与瑞利散射信号的角间距也越大;但是,受钠层高度分布的影响,两光轴间距的增大会造成成像中钠信标光斑的拉长。受外场实验环境的限制,发射与接收望远镜主光轴轴间距约为 5.6 m,在后续章节的成像结果中可以看到,此时钠信光斑与瑞利散射光已经基本分开,且并未观察到明显的光斑拉长现象。激光发射望远镜的主要参数见表 2。

表 2 激光发射望远镜主要设计参数

Tab.2 Main parameters of laser launch telescope

Parameters	Value
Beam quality	Strehl ratio>0.98
Aperture diameter	300 mm
Beam diameter	240 mm@1/e ²
Focusing altitude	90-210 km tunable
Field of view	±2.5'
Throughput	~93%

钠信标回光测量系统利用云南丽江 1.8 m 望远镜作为接收成像望远镜,成像 CCD 位于望远镜卡式焦点上。在 CCD 前放置了一块天文 V 波段滤光片 (Andover Johnson/Bessel UBVRI astronomy filters, 型号 V-band, JOHN-V-25), 用于钠信标 V 星等的计算。大气透过率由恒星在不同高角时的测光数据计算得到^[26-34]。

测光实验中还加入了大气相干长度测量仪^[33-34]和钠原子激光雷达^[35]。大气相干长度测量仪测得的大气相干长度数据用于对钠信标实际光斑大小的估算; 钠原子激光雷达测得的钠原子柱密度及其高度分布数据用于激光器对钠原子激发效率的计算, 但受钠信标激光器与激光雷达激光器信号相互干扰的影响, 钠层数据测量与钠信标回光亮度测量采用了交替工作的模式, 以最大程度地保证所测钠层数据的参考价值。自 2011 年以来二者测得的统计数据对钠信标自适应光学系统的后端设计及后期观测提供了重要的参考依据。

2 钠信标测光方法及理论

实验中将钠信标测光数据与已知星等的恒星测光数据相比较, 根据天文上对星等的定义, 并综合考虑实际使用的 V 波段滤光片透过率曲线、恒星或钠信标光谱、CCD 量子效率曲线的影响, 进而计算得到钠信标在 V 波段内有效的回波光光子数及对应 V 星等。

在标定过程中, 采用了 Bessell 等对 V 波段的定义^[36]: 中心波长 $\lambda_0=551.3$ nm, 透过率峰值处为 $\lambda_c=530.0$ nm, 滤光片透过率曲线的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 84.2 nm。同时, 假定测光系统在 V 波段的定义范围内有相同的透过率。

对恒星(即自然星)和钠信标测光数据的处理, 参考了早期美国星火靶场(SOR)^[26-27]以及近几年国内外对钠信标测光数据的处理方法^[37-38], 结合丽江测光平台自身的特点, 计算处理方法如下。

在对恒星测光时, 由于受 V 波段滤光片透过率和 CCD 量子效率的影响, 需将实际测光系统采集到的恒星图像的灰度值 Φ_{NGS} 归算到经过理想的测光系统后的图像灰度值 Φ_{NGS}' , 即恒星经过理论的 V 波段滤光片, 且 CCD 量子效率恒为 1 的测光系统后的图像灰度值。两者之比为:

$$\frac{\Phi_{\text{NGS}}'}{\Phi_{\text{NGS}}} = \frac{\int_0^{\infty} F_{\text{NGS}}(\lambda) W_{\text{V0}}(\lambda) \frac{\lambda}{hc} \cdot 1 \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} F_{\text{NGS}}(\lambda) W_{\text{Vr}}(\lambda) \frac{\lambda}{hc} \cdot \text{QE}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1)$$

式中: Φ_{NGS} 和 Φ_{NGS}' 分别是归算前和归算后 CCD 上自然星的灰度值, ADU; $F_{\text{NGS}}(\lambda)$ 为自然星的光谱能量分布, $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$; $W_{\text{V0}}(\lambda)$ 和 $W_{\text{Vr}}(\lambda)$ 分别为文献所定义的理论^[36]和实测得到的所用 V 波段滤光片透过率曲线; $\text{QE}(\lambda)$ 为所用 CCD 的量子效率; h 为普朗克常数; c 为真空光速。在忽略大气透过率在 V 波段的起伏变化后, 公式(1)将实际测光系统测量得到的自然星灰度值归算到经过理论 V 波段滤光片和量子效率恒为 1 的 CCD 之后所得到的灰度值, 校正了实验所用 V 波段滤光片与标准滤光片差别以及 CCD 量子效率曲线的影响。

对于钠信标, 在同样的曝光参数设置下, 类似于公式(1), 并考虑到钠信标回光单波长的特性, 将其光谱能量分布视为波长在 589 nm 处的 δ 函数, 归算后钠信标图像灰度值为 Φ_{LGS}' 与归算前数值 Φ_{LGS} 的比值为:

$$\frac{\Phi_{\text{LGS}}'}{\Phi_{\text{LGS}}} = \frac{W_{\text{V0}(\lambda=589\text{nm})}}{W_{\text{Vr}(\lambda=589\text{nm})} \cdot \text{QE}_{(\lambda=589\text{nm})}} \quad (2)$$

式中: 各符号代表的物理量同公式(1), 角标指各物理量在波长 $\lambda=589$ nm 的值。

根据天文学上对星等的定义^[39], 有:

$$M_{\text{LGS}} = M_{\text{NGS}} + 2.5 \log_{10}(\Phi_{\text{NGS}}' / \Phi_{\text{LGS}}') \quad (3)$$

式中: M_{LGS} 为最终计算得到的钠信标的 V 星等; M_{NGS} 为参照恒星的 V 星等; Φ_{LGS}' 和 Φ_{NGS}' 分别来自公式(1)和公式(2)。

然而, 由于钠信标单波长的特性, 将利用公式(3)计算得到的 V 星等数值与宽光谱的自然星的相比较显得不公平。参考美国星火靶场对钠信标星等定义的方法^[26]后, 假定 V 波段滤光片在钠信标的有效波段(即 589 nm 附近)透过率恒为 100%, 得到修正后的钠信标 V 星等为:

$$M_{\text{LGS}}' = M_{\text{LGS}} + 2.5 \log_{10} W_{\text{V0}(\lambda=589\text{nm})} \quad (4)$$

利用公式(4)计算得到钠信标 V 星等数值结果要更接近于自然星的 V 星等数值, 同时与美国星火靶场的计算方法所得结果要更为接近。

根据参考文献^[36], 已知 V 星等数值为 M_{NGS} 的自然星在经过大气层之前在 V 波段滤光片透过率曲线内有效的光子数流量 $f_{\text{TOA}_{\text{NGS}}}$ 为(单位: $\text{photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$):

$$f_{TOA_NGS} = 0.16 \times 3\,640 \times 10^{-0.4M_{NGS}} \times 1.51 \times 10^7 \quad (5)$$

考虑到钠信标单波长的性质,并根据 V 波段滤光片在 589nm 的理论透过率 $W_{V0(\lambda=589nm)} \approx 0.47^{[36]}$,因此,实际上钠信标所提供在大气层上方的光子数流量 f_{TOA_LGS}' 为(单位: $photons \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$):

$$f_{TOA_LGS}' = 0.16 \times 3\,640 \times 10^{-0.4M_{LGS}'} \times 1.51 \times 10^7 \quad (6)$$

3 实验结果

3.1 钠信标光斑大小及形态优化

实验中,通过对钠信标激光器、激光传输光路和激光发射望远镜的优化升级,经过多次的调试后,钠信标光斑大小和形态都有了逐步的提升。图 1 给出了自 2011 年以来钠信标光斑的变化,其中,图 1(a) 横轴为测试时间,纵轴为采集到的钠信标光斑大小

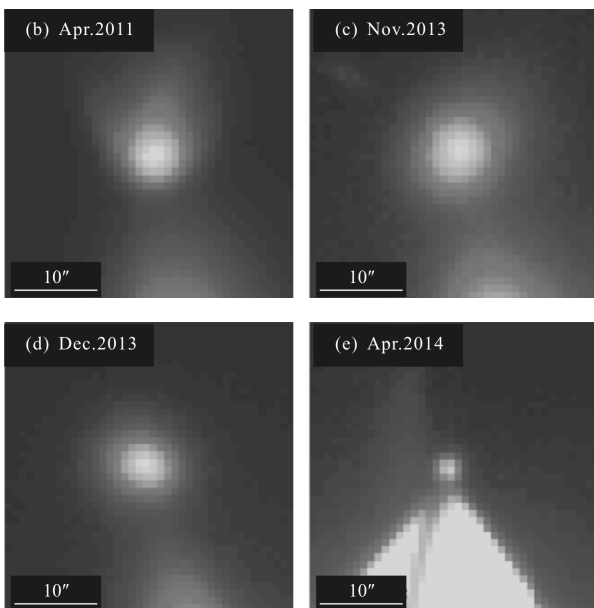
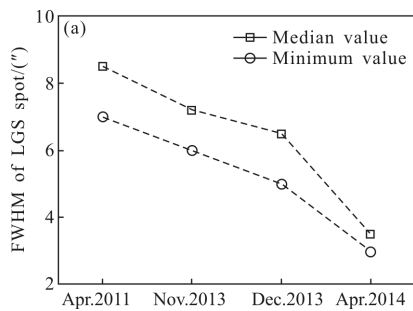


图 1 实验中获得的钠信标光斑图像大小分析及各阶段的光斑形态
Fig.1 Spot size and shape of the sodium beacons during the on-sky test

(FWHM 来计算)。自首次实验以来,钠信标 FWHM 的中间值由 8.5' 降至 3.5' (图中方块线),而最小值则由 7.0' 降至 3.0' (图中圆圈线)。考虑到成像系统相差及视宁度的影响,钠信标在钠层上的实际半高全宽小于 2.0'。图 1(b)~(e) 为对应的各测试阶段钠信标的成像图,显示视场为 47'。

3.2 钠信标波长及偏振优化

在钠信标测光实验前首先对钠信标激光器的中心波长(即中心频率)及出光的偏振态进行优化,以保证钠信标回光亮度的最大化。对钠信标激光器中心频率的优化结果如图 2 所示,测量时激光器的偏振状态为初始的线偏振状态。图 2 中横轴为钠信标激光中心频率的偏移量,以钠信标回光亮度最大处为横轴零点;纵轴为归一化之后的钠信标光斑亮度(单位:ADU)。从图中可以看出,将激光器中心频率调偏时,获得的钠信标亮度也对应地减弱。在实验条件下,当激光器中心频率调偏约 -0.34 GHz 或 +0.43 GHz 时,获得的回光强度为中心频率未调偏时的 80%;而当中心频率调偏约 -0.66 GHz 或 +1.00 GHz 时,获得的回光强度仅为为中心频率未调偏时的 50%。实验中还观察到,在激光器中心频率蓝移时,回光强度的下降速率要小于中心频率红移时的情况,这是由于中心频率蓝移激发到钠原子 D_{2b} 线所致。但受激光器光谱线宽的影响,实验中并未观察到在 D_{2b} 线附近激发钠信标的亮度有极大值的存在。

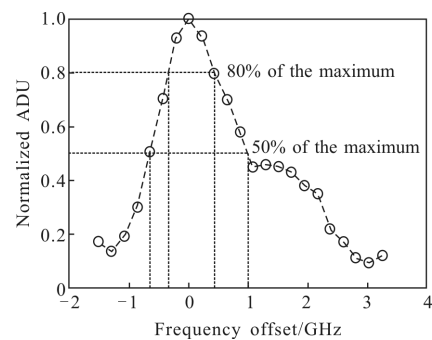


图 2 不同激光中心频率下获得的钠信标图像灰度值结果
Fig.2 ADU value of the sodium beacon image with different frequency offset of the sodium laser

激光器出光的偏振状态由 $\lambda/4$ 波片来控制,通过调节 $\lambda/4$ 波片光轴与激光器自身线偏振方向的夹角,可以得到不同偏振状态的出光,结果见图 3 所示,图中横轴为 $\lambda/4$ 波片的旋转角度,纵轴为接收信

号的光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)信号读数。实验中在 PMT 之前加入了 589 nm 的窄带带通滤光片以提高信号的信噪比,在每个调节角度进行了 10 次的测量(图中×),并用平均值(图中◇)来进行正弦拟合。考虑到实验数据采集的时间较长,在此时间内钠原子柱密度会有所变化,拟合中加入了钠原子柱密度线性变化的参数,最终拟合结果如图中实线所示。

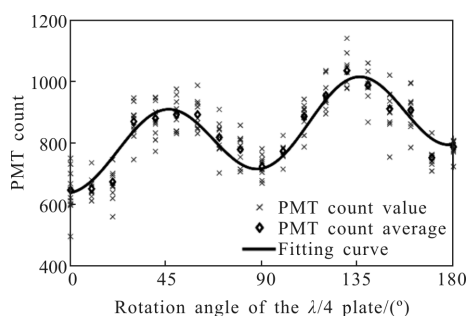


图 3 不同激光偏振状态下 PMT 接收到的钠信标光子数结果
Fig.3 PMT count of the sodium signal with different polarization status of the sodium laser

由于圆偏光的激发效率要高于同等状态下线偏光的结果^[20],因而从图 3 中可以确认,在 $\lambda/4$ 波片旋转角为 45° 和 135° 时,激光出射时的偏振状态为圆偏振,而在 $\lambda/4$ 波片旋转角为 0° 和 90° 时,偏振状态为线偏振。PMT 测得的圆偏振光激发钠信标带来的光子数比线偏振情况下得到的光子数平均要多 34%。

3.3 钠信标回光亮度标定结果

实验中利用 CCD 相机分别在圆偏光和线偏光出光状态下,对不同出光功率时钠信标的回光强度进行了若干次的测量,并利用公式(4)和公式(6)对钠信标的回波光光子数和星等进行了计算,结果如图 4 所示。图(a)和图(c)为 2013 年 11 月 14 日的测量结果,图(b)和图(d)为 2013 年 11 月 16 日的测量结果;图(a)和图(b)为计算得到的钠信标 V 星等,图(c)和图(d)则为计算得到的钠信标在望远镜入瞳处的光子数流量;圆圈和方框分别对应圆偏光和线偏光状态下的测量结果。实验中所得的最亮钠信标等(出光功率 19 W,圆偏光状态)为 7.40 V 星等,对应返回的光子数(折算到大气层上方)为 $9.65 \times 10^6 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在两次的测试中,由于光斑较大(FWHM 在 $5' \sim 7'$ 之间),圆偏光和线偏光所激发的信标均未见明显的饱

和效应。但圆偏光较线偏光带来光子数提升的百分比随着激光功率的升高而增大,这也与理论仿真结果相符^[24]。在不考虑 11 月 16 日激光出光功率 10 W 和 12 W 时的数据(图 4 中虚线框出,其结果波动较大,可能由于钠层活动和大气透过率的变化造成),在同样的出光功率及其他条件下,圆偏光较线偏光带来至少 20%,至多 90%的回波光光子数的提高。

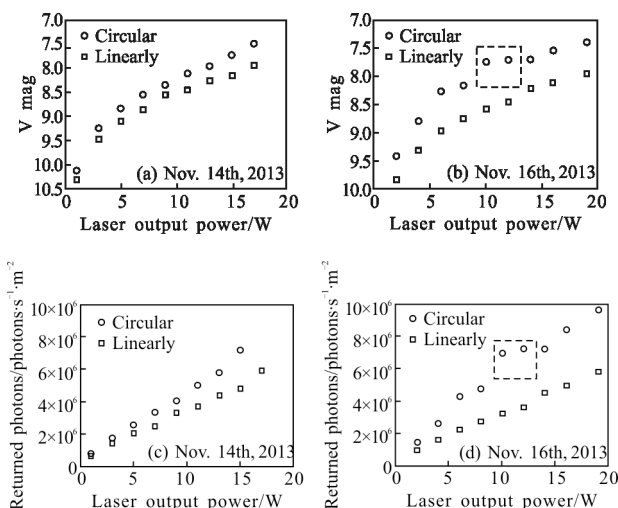


图 4 圆偏光和线偏光状态下所测得钠信标 V 星等及对应的回波光光子数

Fig.4 V magnitude and returned photons of the sodium beacon with circular and linearly polarized light

3.4 钠信标激光器与钠原子耦合效率的计算

在定量分析激光器对钠原子的激发效率时,目前多数仿真及分析采用了 Holzlohner 等提出的钠信标激光器对钠原子耦合效率(coupling efficiency)的概念^[23],其定义为:

$$s_{ce} = \frac{\Phi L^2}{P T_a^{2X} C_{Na}} \quad (7)$$

式中: Φ 为到达接收望远镜表面的钠信标光子数流量(单位: $\text{photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); L 为钠层到接收望远镜的垂直高度; P 为激光从发射望远镜出射时的光功率; T_a 为大气透过率; $X = \sec(\theta)$, 其中 θ 为激光发射的天顶角; C_{Na} 为钠原子柱密度。激光自身耦合效率 s_{ce} (单位: $\text{photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot (\text{atoms} \cdot \text{m}^{-2})^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$) 的数值仅与激光器自身的相关参数(如中心波长、激光线宽、偏振状态等)以及钠层的环境因素(如光斑在钠层的功率密度、钠层所在的地磁场强度及方向等)相关,而与其他外部参数(如大气透过率、钠层柱密度及分布等)无关,在实

验测量中需要将该外部参数的影响标定除去。

在实验过程中,激光发射光束始终指向天顶方向,因而 $\theta=0, X=1$;大气透过率 T_a 采用参考文献[26]中的方法测量计算得到;钠原子柱密度 C_{Na} 及中心高度 L 由钠原子激光雷达测量得到;激光出射功率 $P=P_0 \cdot T_0$,其中 P_0 为激光出光功率, T_0 为测量得到的激光传输光路及激光发射望远镜总的透过率; $\Phi=f_{TOA} \cdot T_a$,其中 T_a 由公式(5)计算得到。图 5 给出了最终耦合效率的测量结果,其中横轴为激光器的出光功率,纵轴为激光与钠原子间的耦合效率,圆圈和方框分别对应圆偏和线偏状态下耦合效率的实验测量结果,虚线则为对测量结果的拟合曲线。可以看出,无论线偏光还是圆偏光状态,随着激光功率的提高,激光的耦合效率也逐步下降,这是由于在较高的功率密度下,钠原子吸收饱和效应的影响逐渐增大所导致^[20]。圆偏光较线偏光有更高的耦合效率,同时在高功率时,圆偏光比线偏光所带来的耦合效率的提高的百分比较低功率时要更多,这也验证了圆偏光的吸收饱和和阈值较线偏光更高^[20]。拟合结果预测即使在更高的功率密度下,圆偏光与钠原子间的耦合效率仍然能超过 $130 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot (\text{atoms} \cdot \text{m}^{-2})^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,满足美国 30 m 望远镜对钠信标激光器耦合效率的要求^[40]。图中圆偏光测量时的波动可能由于大气透过率及钠层活动的变化所致。

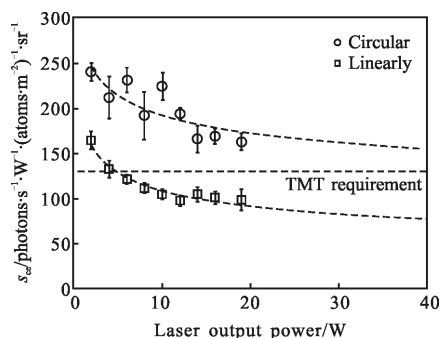


图 5 圆偏光和线偏光状态下激光器耦合效率测量结果

Fig.5 Coupling efficiency of the laser with circular and linearly polarized light

4 结论

文中搭建了一套完整的钠信标测光系统,并根据该系统的特点提出了一种对钠信标星等及回光亮度标定的方法。利用该系统,成功获得了半高全宽最

小 3' (对应到 90 km 钠层上为 1.3 m) 的信标图像。利用已知星等的自然星做对比标定,分析了滤光片透过率曲线、CCD 量子效率曲线等的影响后,得到最亮的信标折算到大气层上方后的返回光子数为 $9.65 \times 10^6 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,对应 V 星等数值 7.4。测量标定了所用钠信标激光器在不同偏振状态、不同出光功率时的耦合效率,验证了圆偏光较线偏光有更高的耦合效率和更大的吸收饱和阈值。通过实验结果预测了在更高的功率密度下,在圆偏光偏振状态下,该激光器仍然会有超过 $130 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{W}^{-1} \cdot (\text{atoms} \cdot \text{m}^{-2})^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的耦合效率,满足美国 30 m 望远镜对钠信标激光器耦合效率的要求。该结果给激光器耦合效率和钠信标回光亮度的数值仿真提供了参考数据,同时为后端钠信标自适应光学系统的指标设计及性能分析提供了参考依据。

参考文献:

- [1] Rousset G, Fontanella J C, Kern P, et al. First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1990, 230: L29-L32.
- [2] Hardy J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [3] Thompson L A, Gardner C S. Experiments on laser guide stars at Mauna Kea Observatory for adaptive imaging in astronomy[J]. *Nature*, 1987, 328(6127): 229-231.
- [4] Greenwood D P, Primmerman C A. Adaptive optics research at Lincoln Laboratory[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1992, 5: 3-24.
- [5] Fugate R Q, Spinhirne J M, Moroney J F, et al. Two generations of laser-guide-star adaptive-optics experiments at the Starfire Optical Range[J]. *JOSA A*, 1994, 11(1): 310-324.
- [6] Boyer C, Ellerbroek B, Gilles L, et al. The TMT laser guide star facility[C]//1st AO4ELT Conference-Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes, EDP Sciences, 2010: 04004.
- [7] Primmerman C A, Murphy D V. Compensation of atmospheric optical distortion using a synthetic beacon [J]. *Nature*, 1991, 353(6340): 141.
- [8] Olivier S S, An J R, Avicola K, et al. Performance of laser guide star adaptive optics at Lick Observatory [C]//SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering and Instrumentation, 1995: 26-37.
- [9] Gavel D, Ammons M, Bauman B, et al. Visible light laser guidestar experimental system (Villages): on-sky tests of new

- technologies for visible wavelength all-sky coverage adaptive optics systems [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2008, 7105: 70150G.
- [10] Jeys T H. Development of a mesospheric sodium laser beacon for atmospheric adaptive optics [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1991, 4(2): 133-150.
- [11] Velur V, Kibblewhite E J, Dekany R G, et al. Implementation of the Chicago sum frequency laser at Palomar laser guide star test bed [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2004: 1033-1040.
- [12] Saito N, Akagawa K, Kato M, et al. Development of all-solid-state coherent 589 nm light source: toward the realization of sodium lidar and laser guide star adaptive optics [C]//Asia-Pacific Remote Sensing Symposium, 2006: 64091H.
- [13] Lee I, Jalali M, Vanasse N, et al. 20 W and 50 W guidestar laser system update for the Keck I and Gemini South telescopes [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2008, 7105: 70150N.
- [14] Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, et al. 33 W quasi-continuous-wave narrow-band sodium D_{2a} laser by sum-frequency generation in LBO [J]. Chinese Physics B, 2014, 23 (9): 094208.
- [15] Calia D B, Hackenberg W, Chernikov S, et al. AFIRE: fiber Raman laser for laser guide star adaptive optics [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2006, 6272: 62721M.
- [16] Feng Y, Calia D B, Hackenberg W, et al. Design of a narrow band 589 nm laser by direct Raman shift in single mode fiber [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2006, 6272: 62724A.
- [17] Feng Y, Taylor L R, Calia D B. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star [J]. Optics Express, 2009, 17(21): 19021-19026.
- [18] Zhang L, Jiang H, Cui S, et al. Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star [J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(6): 889-895.
- [19] Milonni P W, Thode L E. Theory of mesospheric sodium fluorescence excited by pulse trains[J]. Applied Optics, 1992, 31(6): 785-800.
- [20] Milonni P W, Fugate R Q, Telle J M. Analysis of measured photon returns from sodium beacons [J]. JOSA A, 1998, 15 (1): 217-233.
- [21] Milonni P W, Fearn H, Telle J M, et al. Theory of continuous-wave excitation of the sodium beacon [J]. JOSA A, 1999, 16(10): 2555-2566.
- [22] Kibblewhite E. Calculation of returns from sodium beacons for different types of laser [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2008, 7015: 70150M.
- [23] Holzlohner R, Rochester S M, Calia D B, et al. Optimization of cw sodium laser guide star efficiency [J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 510: A20.
- [24] Rochester S M, Otarola A, Boyer C, et al. Modeling of pulsed-laser guide stars for the Thirty Meter Telescope project[J]. JOSA B, 2012, 29(8): 2176-2188.
- [25] Jeys T H, Kibblewhite E, Heinrichs R M, et al. Observation of optical pumping of mesospheric sodium[J]. Optics Letters, 1992, 17(16): 1143-1145.
- [26] Drummond J, Telle J, Denman C, et al. Photometry of a sodium laser guide star at the Starfire Optical Range [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2004, 116(817): 278-290.
- [27] Drummond J, Telle J, Denman C, et al. Photometry of a sodium laser guide star from the Starfire Optical Range. II. Compensating the pump beam [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2004, 116(824): 952-960.
- [28] Calia D B, Guidolin I, Friedenauer A, et al. The ESO transportable LGS Unit for measurements of the LGS photon return and other experiments [C]//SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2012, 8450: 84501R.
- [29] Wei K, Bo Y, Xue X, et al. Photon returns test of the pulsed sodium guide star laser on the 1.8 meter telescope [C]// SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation, 2012, 8447: 84471R.
- [30] Liu Jie, Wang Jianli, Lv Tianyu, et al. Research on the calculation method of sodium laser guide star magnitude [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomical, 2013, 43(3): 318-323. (in Chinese)
刘杰, 王建立, 吕天宇, 等. 钠激光导星星等计算方法研究 [J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013, 43(3): 318-323.
- [31] Wang Feng, Chen Tianjiang, Luo Zhongxiang, et al. Experimental study on backscattering characteristics of sodium beacon based on a long pulse laser [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014208. (in Chinese)
王锋, 陈天江, 雒仲祥, 等. 基于长脉冲光源的钠信标回光特性实验研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014208.
- [32] Xu Zuyan, Bo Yong, Peng Qinjun, et al. Progress on sodium laser guide star [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,

- 45(1): 0101001. (in Chinese)
许祖彦, 薄勇, 彭钦军, 等. 激光钠导引星技术研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0101001.
- [33] Yu Longkun, Wu Yi, Hou Zaihong, et al. Study on the measurement of coherence length by differential image motion monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (12): 1201004. (in Chinese)
于龙昆, 吴毅, 侯再红, 等. 利用差分像运动监测仪法测大气相干长度的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1201004.
- [34] Yu Longkun, Shen Hong, Jing Xu, et al. Study on the measurement of isoplanatic angle using stellar scintillation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301001. (in Chinese)
于龙昆, 沈红, 靖旭, 等. 利用恒星闪烁测量等晕角的研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301001.
- [35] Gao Q, Chu X, Xue X, et al. Lidar observations of thermospheric Na layers up to 170 km with a descending tidal phase at Lijiang (26.7°N, 100.0°E), China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, 120 (10): 9213 - 9220.
- [36] Bessell M S. UBVR_I photometry II: the Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1979, 91(543): 589.
- [37] Feng L, Shen Z, Xue S, et al. A sodium laser guide star coupling efficiency measurement method [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 9(16): 144.
- [38] Otarola A, Hickson P, Gagne R, et al. On-sky tests of a high-power pulsed laser for sodium laser guide star adaptive optics[J]. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2016, 5 (1): 1650001.
- [39] Milone E F F, Sterken C. *Astronomical Photometry: Past, Present, and Future* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011.
- [40] The Science-based Requirements Document of the Thirty Meter Telescope [EB/OL]. [2015-12-14]. <http://www.tmt.org/documents>.