

1.8 米望远镜钠信标自适应光学系统的高对比度成像性能研究

邓可然^{1,2,3}, 魏凯^{1,2,3}, 晋凯^{1,2}, 董若曦^{1,2,3}, 李敏^{1,2}, 张雨东^{1,2,3}

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, 四川 成都 610209;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 系外行星的直接成像是当今国际天文学研究的热点,而对潜在的系外行星候选体进行大面积普查将是未来十年天文学的迫切需要。国际上中小型 2 m 级望远镜上部署的 ROBO-AO 瑞利激光信标自适应光学系统(AO),可以灵敏而快速地删察系外行星候选体。但瑞利信标高度引起的聚焦非等晕效应是限制其行星探测能力的重要因素。基于 1.8 m 望远镜 61 单元钠信标自适应光学系统优化构建系外行星高对比度成像系统,它将在近红外波长范围内提供系外行星的高对比度成像。通过对钠信标 AO 高对比度成像过程的仿真,发现在理论上,钠信标 AO 系统的系外行星高对比度成像性能优于 ROBO-AO,即在 2 h 曝光时间内,可以实现与母恒星光通量比为 4×10^{-7} 的行星的直接成像,而相同环境下,ROBO-AO 系外行星直接成像能力为 1×10^{-6} ,其中行星与恒星的角间距为 1"。

关键词: 钠信标; 高对比度成像; 星冕仪; 自适应光学系统

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200058

Research on high-contrast imaging performance of 1.8 m telescope sodium beacon adaptive optical system

Deng Keran^{1,2,3}, Wei Kai^{1,2,3}, Jin Kai^{1,2}, Dong Ruoxi^{1,2,3}, Li Min^{1,2}, Zhang Yudong^{1,2,3}

1. Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Direct imaging of exoplanets and candidates is a hot topic in international astronomy research today, and the large-scale census of potential exoplanet candidates will be an urgent need for astronomy in the next decade. The ROBO-AO Rayleigh laser beacon adaptive optical system deployed on 2 m class telescopes is essential for sensitive and rapid characterization of the exoplanet candidates, but the focus anisoplanatism effect caused by the height of Rayleigh beacons is an important factor affecting its planetary detection capabilities. An exoplanet high-contrast imaging system for the 61 units sodium beacon adaptive optics system of the 1.8 m telescope was constructed. It would provide high-contrast imaging of exoplanets in the near-infrared wavelength. By simulating the sodium beacon AO high-contrast imaging process, the high-contrast imaging performance of the exoplanets of the sodium beacon AO system was better than that of ROBO-AO in theory, and within two hours of exposure time, direct imaging of planets with a parent star light flux ratio of 4×10^{-7} could be achieved,

收稿日期:2020-05-24; 修订日期:2020-06-12

基金项目:国家自然科学基金(11443009)

作者简介:邓可然(1991-),男,博士生,主要从事自适应光学高对比成像的研究工作。Email: dken2140@163.com

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

while under the same environment, the direct imaging capability of ROBO-AO exoplanets is 1×10^{-6} , where the angular distance between the planet and the star is $1''$.

Key words: sodium laser guide star; high-contrast imaging; coronagraph; adaptive optics system

0 引言

2019 年 10 月 8 日, 诺贝尔物理学奖颁发给了天文学家米歇尔·麦耶和迪迪埃·诺奎斯, 以表彰他们在 1995 年发现类太阳恒星附近的系外行星^[1]。截止到 2019 年 12 月 30 日, 根据美国国家航空航天局 NASA 官网公布的数据 (exoplanets.nasa.gov), 天文学家已经证实了 4104 颗系外行星的存在, 如图 1 所示。被发现的大多数行星都是通过间接探测技术实现的, 即通过探测它们对恒星光的影响来推断行星的存在。只有极少部分系外行星是通过直接成像法探测发现, 但是对系外行星的直接成像更有利于研究其光谱和大气等, 这是判断行星是否宜居以及回答人类在宇宙中是否孤独的重要依据^[2]。

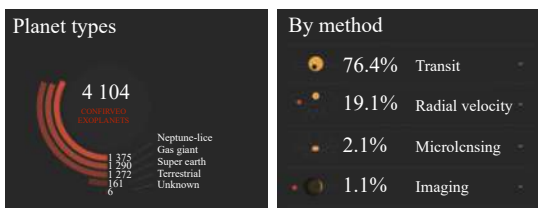


图 1 截至 2019 年 12 月 30 日, 已经证实的系外行星

Fig.1 As of December 30, 2019, the discovered exoplanets

相比于间接探测法, 系外行星直接成像探测法发现的行星数量只占总体的 1.1%, 主要是因为对系外行星进行直接成像的高对比度成像系统对恒星的亮度具有较高的要求。目前的高对比度成像的主要结构为用于精确校正大气湍流等因素造成的波前误差的“超级”自适应光学系统 (ExAO) 和用于抑制恒星衍射的星冕仪。例如 Gemini 望远镜的 GPI^[3], Subaru 望远镜的 SCExAO^[4], VLT 望远镜的 SPHERE^[5], Palomar P3K^[6], MagAO^[7] 和 LBTAO^[8]。目前用于高对比度成像的“超级”自适应光学系统朝着更“多”和更“快”方向发展: 更“多”指的变形镜 (DM) 和波前传感器 (WFS) 单元数更多; 更“快”指的是 WFS 探测频率更快, 其目的是最大限度地减小由 ExAO 单元数和探测频率快慢引起的拟合误差, 伺服误差和混淆误差等。但是, “多”和“快”也意味着, 为了保证每个 WFS 子孔

径探测光斑质心精度所需的信噪比 (SNR), 因此需要更加明亮的导引星。目前已知的大多数系外行星围绕着暗弱母星, 如图 2 所示, 而目前的高对比度成像自适应光学系统只能对具有较亮母星的行星进行探测^[2]。解决高对比度成像自适应光学系统在系外行星直接成像过程中的恒星亮度问题, 并提高可探测恒星-行星系统的天空覆盖率, 为目前系外行星直接探测领域的重点研究方向。

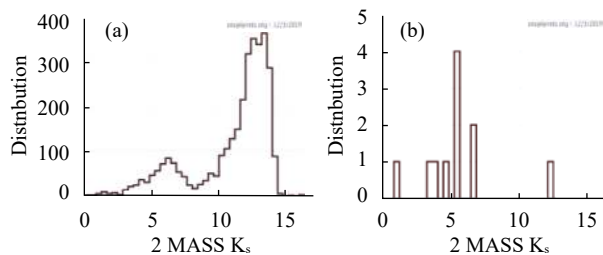


图 2 直接成像系外行星系统主星亮度分布

Fig.2 Brightness distribution of the main star of the direct imaging exoplanet system

1980 年代, 美国空军为了提高自适应光学系统 (AO) 的能够应用的天区, 其在星火靶场率先开展了利用激光在高空大气人造亮星的实验, 这种人造亮星称为激光导引星 (LGS) 技术^[9]。有两种方法产生人造的激光导引星: (1) 利用大气分子的后向瑞利散射光产生瑞利激光信标, 其高度通常在 10 km 左右; (2) 利用 90 km 左右的钠层钠原子共振散射荧光产生钠信标。通过调节激光发射望远镜的方向进而调节激光信标在天空中的位置, 就可以确保 AO 系统波前探测视场内都能存在亮星。目前用于系外行星和伴星探测的激光信标 AO 系统包括 ROBO-AO 系统和正在升级的 ROBO-AO-2 系统^[10-11]。其中正在运行的 ROBO-AO 利用高亮度瑞利信标进行波前误差校正的激光信标自适应光学系统, 2004 年安装在 Palomar 天文台 1.5 m 望远镜上。2014 年以来, 天文学家使用 ROBO-AO 系统对开普勒空间望远镜发现的系外行星候选体进行观测, 并直接证实了其中一部分为恒星的伴星^[12]。为了提升 ROBO-AO 系统的性能以能够进一步提升

其系外行星探测能力,科学家们在 2014 年对 ROBO-AO 进行一系列升级工作。除了光路的调整外,还主要包括以下几个方面:望远镜方面,新一代 ROBO-AO-2 系统将会安装在 2.2 m 的夏威夷大学望远镜;激光器方面,新一代系统的激光器功率将从第一代的 10 W 提升到 15 W;变形镜方面,将从 ROBO-AO 的 120 单元变形镜升级到 492 单元;波前传感器方面,除了相应于 DM 改变子孔径数量外,也将 E2V-CCD39 探测器升级到性能更好的 EMCCD,其中读出噪声 $1e^-$。在此优良系统性能的条件下,科学家们计划利用 ROBO-AO-2 系统对 ROBO-AO 无法探测的系外行星候选体进行成像^[13]。但是基于瑞利信标的 ROBO-AO 等系统,由于瑞利信标高度引起的聚焦非等晕效应将是影响其行星探测能力的最终理论限制。

相比于瑞利信标,钠信标亮度的影响因素更为复杂。外界因素主要有:钠层密度分布和钠层温度、大气透过率、地磁场。内部因素主要有:激光器功率、激光在钠层的功率密度分布、激光偏振状态、激光中心波长、频谱宽度、纵模分布等。受上述因素影响,钠信标亮度一般为视星等 7-8 等星^[14];因为其亮度偏暗的原因,为了保证钠信标自适应光学系统 WFS 子孔径质心计算时的 SNR,设计的 WFS 单元数较少,探测频率较慢。

2012 年,中国科学院光电技术研究所在国内率先研制了基于钠信标的第一代钠信标自适应光学系统,并在 2014 年首次获得了基于钠信标的闭环成像结果^[15]。为了实现在近红外波段的衍射极限成像,光电所自主研制的第二代钠信标自适应光学系统已安装在 1.8 m 望远镜 Nasmyth 平台上。它是一个具有 61 个单元的变形镜、Linux 实时控制器、内闭环倾斜/倾斜镜的全新的激光信标自适应光学系统。钠信标二期自适应光学系统已在丽江观测站 1.8 m 望远镜上进行多次测试性实验^[16]。为了探讨其在系外行星探测高对比度成像的性能并与国际上正在运行的 ROBO-AO 的性能对比,文中将结合用于衍射抑制的星冕仪技术,对 61 单元钠信标自适应光学系统的高对比度成像性能进行理论估计仿真验证。

文中对丽江 1.8 m 望远镜开展钠信标自适应光学系统高对比度成像的理论分析和仿真验证,包括:

(1) 星冕仪成像模型建立;

(2) 丽江 1.8 m 望远镜钠信标自适应光学高对比度成像系统设计;

(3) 残余误差对比度和波前探测时间优化;AO 仿真;星冕仪仿真;

(4) 与 1.5 m 望远镜运行的 ROBO-AO 系统进行高对比度成像性能的初步比较。

对 1.8 m 望远镜钠信标自适应光学系统开展高对比度成像研究,将会为国内将要建设完成的大型红外通用望远镜发展新理念的钠信标高对比度成像自适应光学系统作出重要指导意义,并且降低主星亮度需求,扩展科学研究范围。

1 星冕仪成像模型建立

性能评估参数是任何自适应光学系统优化要解决的第一个关键点。与经典的 AO 系统不同,残余方差和 Strehl 比不能精确地用于 AO 的高对比度评价工作。它们必须由更精确直观的性能评估参数代替,该参数可以提供有关像平面中经过星冕仪衍射抑制后,各位置光子数相对于整体光子数的比值。在过去的几年中,科学家们已经提出了大量的星冕仪概念,从 Lyot 星冕仪到干涉星冕仪,例如四象限星冕仪。每种方法都有其自身的优缺点,并且在多个高对比度成像系统投入使用。但是无论如何,星冕仪的目的是消除来自轴上导引星的相干光。因此,可以用公式 (1) 来分析定义星冕仪成像模型^[17]:

$$C_{res}(\theta) = \left\| \text{FT} \left[P(r)A(r)e^{i\varphi(r)} - \sqrt{E}P(r) \right] \right\|^2 \quad (1)$$

式中: $C_{res}(\theta)$ 为经过星冕仪后像面 θ 处的光子数与总的光子数之比; $A(r)$ 为波前振幅; $P(r)$ 为光瞳函数; FT 表示傅立叶变换; $\varphi(r)$ 为波前相位; r 为主镜空间坐标; E 表示短曝光时间下的相干能量,用公式 (2) 表示:

$$E = \exp[-\sigma_\varphi^2 - \sigma_{\log(A)}^2] \quad (2)$$

式中: σ_φ^2 为相位误差; $\sigma_{\log(A)}^2$ 为振幅误差。

当 $E=1$ 时,即所有的相位和振幅效应都被校正后,所有来自恒星的光都被抵消了。当 AO 进行部分校正时,像平面上的点扩散函数 (PSF) 由相干中心核 (衍射部分 $f_{core}(\theta)$) 和非相干光晕组成 ($f_{halo}(\theta)$):

$$f_{AO}(\theta) = S f_{core}(\theta) + (1-S) f_{halo}(\theta) \quad (3)$$

式中: S 为 Strehl 比。考虑一个完美的星冕仪, 即完全消除衍射部分 $f_{\text{core}}(\theta)$, 而非相干光晕部分 $(1-S)f_{\text{halo}}(\theta)$ 与 $C_{\text{res}}(\theta)$ 呈正比, 因此 $C_{\text{res}}(\theta)$ 也被称为光晕对比度。最终, 光晕对比度与剩余相位功率谱密度 (PSD) 成正比^[17]:

$$(1-S)f_{\text{halo}}(\theta) \propto C_{\text{res}}(\theta) \propto \langle |\text{FT}[\varphi(r)]|^2 \rangle \quad (4)$$

在这种理想情况下, 位于角位置 θ 的行星的信噪比 (SNR) 可以简单地表示为^[17]:

$$\text{SNR} = \frac{N_p}{\sqrt{N_s(\theta)}} \cdot \sqrt{T} \quad (5)$$

式中: T 是曝光时间; $N_s(\theta)$ 和 N_p 分别是位置 θ 上每秒的恒星光子数 (经星冕仪) 和行星光子数。 N_p 和 $N_s(\theta)$ 可以从 PSF 图像计算得出:

$$N_p = F_p \frac{\pi}{4} \tau D^2 S \quad (6)$$

以及

$$N_s(\theta) = F_s \frac{\pi}{4} \tau D^2 C_{\text{res}}(\theta) \quad (7)$$

式中: F_p 为行星的光子流密度 (photons/s·m⁻²); F_s 为恒星的光子流密度 (photons/s·m⁻²); τ 为透过率; D 为望远镜口径。

结合公式 (5)~(7), 可以推导出系统的系外行星直接成像能力公式, 即在曝光时间 T 秒内达到能够分辨行星信号 SNR 时, 所需的行星与恒星光通量比^[17]:

$$\frac{F_p}{F_s} = \frac{2 \cdot \text{SNR}}{D \cdot S} \cdot \sqrt{\frac{C_{\text{res}}(\theta)}{\pi \cdot F_s \cdot T \cdot \tau}} \quad (8)$$

即可直接成像的行星/恒星光通量比与 $C_{\text{res}}(\theta)$ 的平方根成比例。通过公式 (4) 得出的结论, 即 $C_{\text{res}}(\theta)$ 与 AO 残余误差的相位功率谱密度呈正比, 而 AO 残余误差的 PSD 主要由 4 个经典 AO 误差 PSD 和外部误差 (例如激光导引星下的聚焦非等晕误差) 组成:

$$C_{\text{res}}(\theta) = C_{\text{fit}} + C_{\text{temp}} + C_{\text{alias}} + C_{\text{nois}} + C_{\text{focal}} \quad (9)$$

光晕对比度 $C_{\text{res}}(\theta)$ 与拟合误差对比度 C_{fit} , 时间误差对比度 C_{temp} , 混淆误差对比度 C_{alias} , 探测误差对比度 C_{nois} 和聚焦非等晕误差对比度 C_{focal} 相关。每个误差项在第 3 节中进行详细描述。

2 高对比度成像系统设计

1.8 m 望远镜 61 单元钠信标自适应光学高对比

度成像系统的布局如图 3 所示。使用 1.8 m 望远镜的 Nasymth 焦点和离轴抛物面反射镜, 将望远镜主镜成像到 61 单元变形镜 DM 上。光束通过 DM 之前, 首先经过倾斜镜 (TM)。光束经 DM 反射后, 通过分光镜 (BS1); BS1 将波长 450 nm 和 550 nm 之间的光透射到 3×3 自然导星波前传感器 (NGS WFS), 并将波长大于 550 nm 的光反射到一对离轴抛物面反射镜中。离轴抛物镜将光束的口径从 40 mm 降低为 16 mm, 并将光传输到另一块分光镜 (BS3)。BS3 将波长 589 nm 的光反射到 6×6 钠激光导星波前传感器 (LGS WFS), 并将其余波长的光传输到 BS4。然后, BS4 将光分为 2 个路径, 用于不同波长的科学相机。一台成像相机用于 I 波段, 覆盖 600~900 nm 的波长, 而另一台成像相机则用于 900~1700 nm 的 J 波段。高对比度成像系统用 J 波段相机成像, 并在 J 波段相机前布局一个高对比度星冕仪系统, 如图 4 所示。

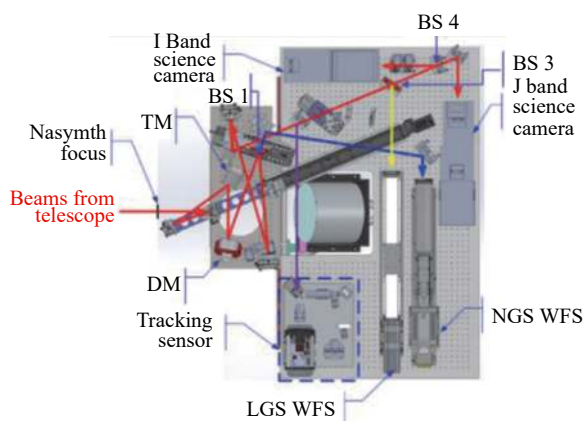


图 3 钠信标二期自适应光学系统布局图

Fig.3 Layout of the 2nd prototype sodium beacon AO

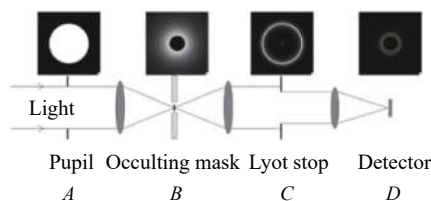


图 4 相位掩膜星冕仪系统设计示意图

Fig.4 Design schematic of a phase mask coronagraph system

利用相位掩膜星冕仪技术可实现对恒星衍射光抑制^[18], 其原理示意图如图 4 所示。通过在 B 处加入掩膜抑制衍射光斑的中心核; 通过在 C 处加入用于调制衍射光斑其他衍射环的光阑, 以达到在成像探测面

D 处抑制行星光衍射的作用。

61 单元钠信标自适应光学系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 钠信标自适应光学系统参数表

Tab.1 Parameter table of sodium beacon adaptive optical system

	Parameters	Standard value
Atmosphere	Fried parameter r_0	10 cm @550 nm
	Turbulence height H_t /km	0.3 5 12
	Fractional r_0	0.5 0.3 0.2
Telescope	Wind speed v /m·s ⁻¹	5
	D /m	1.8
	Height H_{LGS} /km	90
LGS	Brightness magnitude	8
	Angle to target/(°)	0
	WFS sub-aperture	9×9
AO	WFS frequency f /Hz	500–2 000
	WFS read-out noise	2 e/pixel

3 误差光晕对比度和波前探测频率优化

该节首先通过各误差 PSD 的解析表达式,推导出各误差对比度,并对系统参数进行优化;然后基于 OOMAO 仿真工具^[19],对经过优化的 AO 闭环进行了完整而详尽的仿真:包括光在大气中的菲涅耳传播,变形镜的精确模型(具有各种影响函数,非线性和滞后效应等),波前传感器设备,以及控制算法;最后对星冕仪的工作原理进行仿真,得到经过 AO 和星冕仪的像平面 PSF。

3.1 各误差对比度

F. Rigaut 首先提出了各 AO 系统各误差 PSD 一般表达式^[20]。结合公式(9)和参考文献[21],得到各误差对比度的解析表达式,其中包括:

来自可变形反射镜和 WFS 的低通空间滤波,导致的拟合误差。拟合误差在像平面 0.1'' 处的光晕对比度为:

$$C_{fit} = 10^{-27} \cdot \frac{d^{16/3}}{D^2 \lambda^4 r_0^{10/3}} \quad (10)$$

式中: d 为子孔径大小; λ 为成像波长。

WFS 空间采样引起混淆误差;混淆误差在像平

面 0.1'' 处的光晕对比度为:

$$C_{alias} = 10^{-14} \cdot \frac{d^{11/3}}{D^2 \lambda^2 r_0^{5/3}} \quad (11)$$

控制回路延迟引起时间误差;时间误差在像平面 0.1'' 处的光晕对比度为:

$$C_{temp} = \frac{v^2 \left(\frac{ts}{2}\right)^2}{2D^2 r_0^{5/3}} \quad (12)$$

式中: ts 为 WFS 积分时间, $ts = 1/f_i$ 。

WFS 噪声引起测量误差;测量误差在 0.1'' 处的光晕对比度为:

$$C_{nois} = \frac{1}{10D^2 d^2 F_s t_s} \quad (13)$$

钠信标有限高度和望远镜口径之间的锥形效应引起聚焦非等晕误差;聚焦非等晕对成像对比度的影响,不仅与信标高度和望远镜口径相关,还与湍流的垂直分布相关,但是与波前传感器积分时间无关。

将表 1 中的系统参数代入公式(10)~(13),得出光晕对比度与 WFS 积分时间的关系,如图 5 所示,并对 ts 求偏导数可以得出 AO 系统 WFS 的最佳探测频率为 1400 Hz。

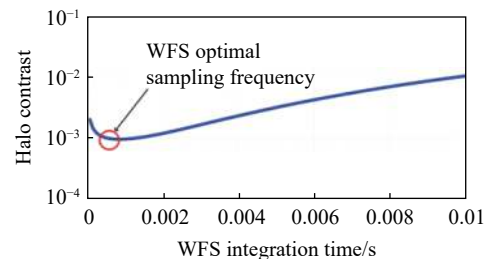


图 5 光晕对比度与 WFS 积分时间的关系

Fig.5 Relationship between halo contrast and WFS integration time

将 AO 系统的 WFS 最佳积分时间代入公式(9),得到 1.8 m 61 单元钠信标自适应光学在像平面 0.1'' 附近的光晕对比度约为 10^{-3} 。

3.2 钠信标 AO 仿真系统

自适应光学系统中核心的部分 WFS 和 DM。文中使用 OOMAO 上的 Shack-Hartmann 波前传感器模组用作 WFS。Shack-Hartmann 波前传感器由微型透镜阵列和 CCD 组成。按照傅立叶光学,仿真程序通过在 Shack-Hartmann 模组中嵌入微型透镜阵列(lenslet Array)模组和探测器(detector)模组。lensletArray 类

执行光波前到探测器的数值 Fraunhofer 传播。探测器模组实现了包括泊松和读出噪声在内的 CCD 相机探测过程。通常情况下,微透镜阵列实现 Nyquist 采样。对于 SH-WFS, 采用了阈值重心方法 (TCoG) 来估计从焦平面图像上的光斑倾斜。

在这项仿真过程中, DM 由一组影响函数组成。影响函数形状由两项三次贝塞尔曲线得出的:

$$B_1(t) = (1-t^3)P_0 + 3(1-t)^2tP_1 + 3(1-t)t^2P_2 + t^3P_3, t \in [0, 1] \quad (14)$$

$$B_2(t) = (1-t^3)P_3 + 3(1-t)^2tP_4 + 3(1-t)t^2P_5 + t^3P_6, t \in [0, 1] \quad (15)$$

$P_k = (x_k, z_k)$ 是 x - z 平面中的点。当 t 在 0~1 之间变化时, 如图 6 所示, 影响函数一维半截面是通过将两个贝塞尔曲线 ($B(t) = [B_1(t), B_2(t)]$) 级联而获得的。图中的标记从左到右对应于从 $k = 0 \sim 6$ 的点 P_k 。

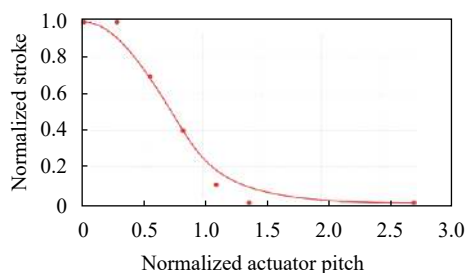


图 6 DM 的影响函数

Fig.6 Influence function of the DM

AO 控制过程中, 首先利用标准点光源标定 WFS 的相互作用矩阵 (IM), 并计算 WFS IM 的奇异值分解, 分别得到相互作用矩阵的逆矩阵 M 。

589 nm 脉冲激光产生的钠信标回光中存在不完备的湍流信息 (相对于无限远的目标), 因此 WFS 可以采样几乎整个湍流信息。WFS 测量的相位将为:

$$\Phi_{WFS} = \Phi_{atmos} \quad (16)$$

式中: Φ_{atmos} 是由高阶 WFS 采样的湍流相位, 并将测量的波前斜率向量存储到矩阵 S_{ray} 中。系统进行波前重建和波前闭环校正。闭环控制器是一个简单的积分器, 其中变形镜形变系数 c 由以下公式给出:

$$c_{n+1} = c_n - gM_{ray}S_{ray} \quad (17)$$

式中: g 为积分增益。波前重建算法采用最小二乘算法 (LSR)。

4 星冕仪仿真

第 1 节星冕仪建模过程, 表征了星冕仪的一般作用原理, 即消除轴上的相干光或衍射极限部分。通过公式 (3) 得出, AO 校正后的像平面 PSF 由衍射极限部分和光晕部分组成, 其中衍射极限部分为系统在没有任何波前误差下的 PSF。星冕仪模拟示意图如图 7 所示, 在单光谱仿真中, 很容易得到衍射极限部分。因此, 可以将原始 AO 处理后的 PSF 减去衍射部分, 得到光晕部分来代替星冕仪的工作过程, 此方法也被称为 PSF 差分法。

将 AO 过程和星冕仪过程结合起来, 得到经过 AO 校正和 PSF 差分仿真过程的光晕对比度与 WFS 积分时间的关系, 如图 8 中蓝色倒三角所示, 即光晕对比度小值约为 10^{-3} , 且 WFS 最佳积分为 1 ms, 与理论计算值基本一致 (蓝色实线)。此外, AO 系统

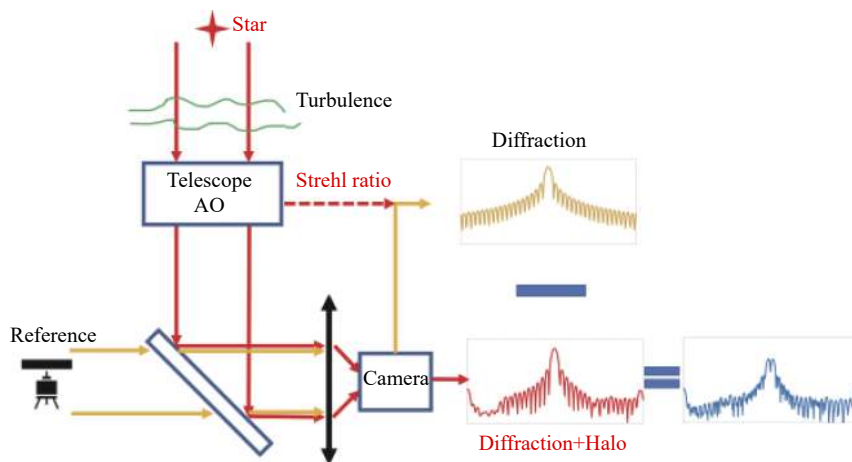


图 7 仿真实验中, 星冕仪原理图

Fig.7 Coronagraph in simulation experiment

的闭环残余误差与 WFS 积分时间的关系,如图 8 中红色圆形和右坐标所示。

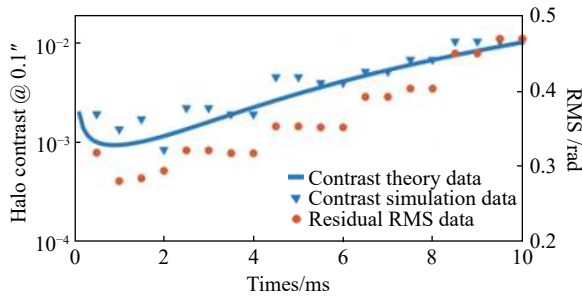


图 8 光晕对比度和波前闭环残余误差与 WFS 积分时间的关系图。蓝色实线为光晕对比度的理论分析值,蓝色倒三角为光晕对比度的仿真结果,红色圆形为仿真过程中波前残余误差值

Fig.8 Halo contrast and wavefront closed-loop residual error with WFS integration time. The blue solid line is the theoretical analysis of the halo contrast and the blue inverted triangle is the simulation result, the red circle is the residual wavefront error

将仿真最优结果代入公式 (8), 得到钠信标高对比度成像系统, 能够直接成像的行星/恒星光通量比与行星角间隔的关系, 如图 9 所示。

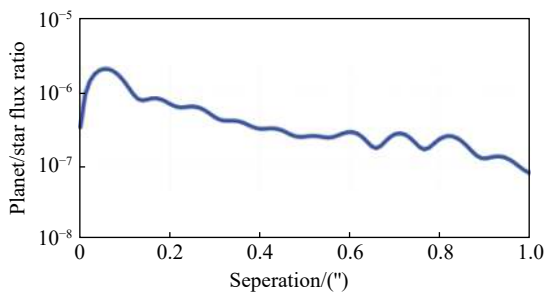


图 9 在 3 h 内达到 SNR = 5 所需的行星/恒星亮度比与行星角间隔的关系图

Fig.9 Relationship between planetary/star stellar brightness ratio and planetary angular interval required to reach SNR = 5 in 3 h

由此可见, 经过 WFS 积分时间优化后的钠信标自适应光学高对比度成像系统, 在像平面 1"附近可以探测的行星/恒星亮度比 (或称光通量比) 为 10^{-7} , 其中恒星的亮度为 $m_J=9.5$ 等星, 成像曝光时间为 3 h, SNR 为 5。

5 与 ROBO-AO 的高对比度成像性能对比

2014 年以来, 科学家利用 ROBO-AO 系统对开普

勒空间望远镜标记的系外行星候选体进行观测, 并取得了丰富的探测成果; ROBO-AO 探测的其中一些候选系外行星 (或伴星) 与恒星光通量比如图 10 中绿圈所示。根据系外行星直接成像能力公式 (8), ROBO-AO 可以实现对行星-恒星光通量比 10^{-6} 以内的系外行星的直接成像 (曝光 2 小时 $SNR=5$, 行星与恒星的角间距为 1"), 如图 10 中紫色实线所示^[22]。考虑到丽江 1.8 m 望远镜与 Palomar 1.5 m 望远镜口径相当, 而且丽江钠信标 AO 系统与 ROBO-AO 单元数相当, 但是最大的不同之中在于两个 AO 系统使用的导引星类型, 即两系统的聚焦非等晕效应的差异。

采用表 1 中的大气湍流参数, ROBO-AO 瑞利导星和丽江 1.8 m 钠导星的聚焦非等晕相位开环波面如图 11 所示。瑞利导星的聚焦非等晕开环相位误差的均方根 (RMS) 为 2.15 rad; 钠导星的聚焦非等晕开环相位误差的 RMS 为 0.44 rad。在上述条件下, 钠导星的聚焦非等晕远小于瑞利导星, 这是丽江 1.8 米望远镜钠导星最终高对比度成像性能能够超过 ROBO-AO 的主要因素。

最后, 将两种 AO 系统的系外行星直接成像能力进行对比, 如图 10 所示, 蓝色实线为预测的 61 单元

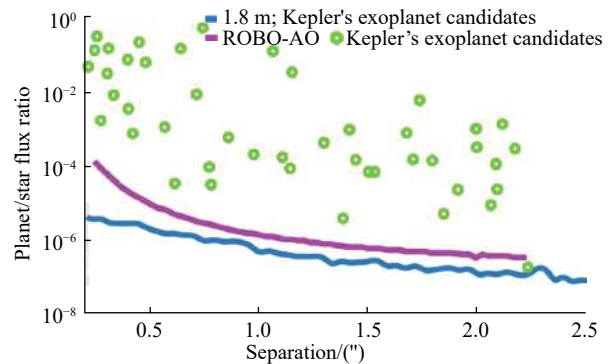


图 10 在 2 h 内达到 SNR = 5 所需的行星/恒星亮度比与行星角间隔的关系图。绿色圆圈表示行星与恒星的亮度比; 紫色实线为 Robo-AO 系外行星探测能力; 蓝色实线为钠信标 AO 系外行星探测能力

Fig.10 Relationship between planetary/star stellar brightness ratio and planetary angular interval required to reach SNR = 5 in 2 h. The green circle indicates the brightness ratio of the planet to the star; the purple solid line indicates the Robo-AO exoplanet detection capability; the blue solid line indicates the sodium beacon AO exoplanet detection capability

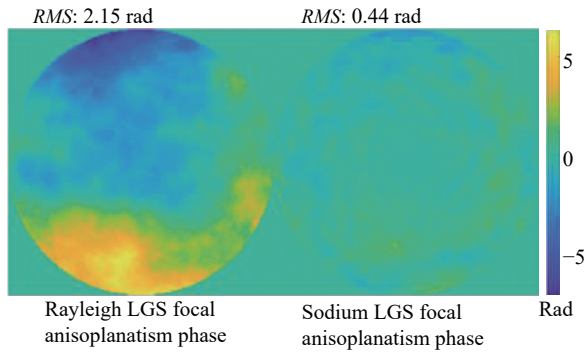


图 11 ROBO-AO 瑞利导星和丽江 1.8 m 钠导星的非等晕相位
Fig.11 Focal anisoplanatism phases of ROBO-AO Rayleigh guide star and Lijiang 1.8 m sodium guide star

钠信标 AO 高对比度成像系统的系外行星直接成像能力 (恒星星等为 $m_J=13$ 等星, 曝光时间 2 h, $SNR=5$); 钠信标 AO 高对比度成像系统可以实现对行星-恒星光通量比为 $3 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ 的系外行星直接成像, 其中行星与恒星的角间距在 $0.1 \sim 2''$ 之间; 在相同条件下, ROBO-AO 可以直接成像的行星与恒星的光通量比为 $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-7}$ 。因此在理论上, 钠信标 AO 高对比度成像系统的整体性能优于 ROBO-AO, 并且能够对图中的系外行星候选体进行直接探测。

6 总 结

以各误差光晕对比度为基础, 结合丽江观测站一般大气条件和钠信标亮度, 对丽江 1.8 m61 单元钠信标自适应光学系统残余误差对成像对比度的影响和高对比度成像性能进行了分析和估计。结果表明, 钠信标自适应光学高对比度成像系统的 WFS 最佳探测频率为 1 400 Hz; 并且在最优探测频率下, 钠信标 AO 系统的系外行星直接成像能力优于 ROBO-AO, 即在两小时曝光时间内, 可以实现与母恒星光通量比为 4×10^{-7} 的行星的直接成像; 而相同环境下, ROBO-AO 系外行星直接成像能力为 1×10^{-6} , 其中行星与恒星的角间距为 $1''$ 。1.8 m 望远镜钠信标 AO 系统有望实现对部分开普勒空间望远镜发现的系外行星候选体进行直接探测, 为未来我国望远镜利用钠信标 AO 实现系外行星大规模大面积直接成像普查, 提供了一种可行的技术途径和理论预期性能研究方法。

参考文献:

[1] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type

star [J]. *Nature*, 1995, 378(6555): 355-359.

[2] Guyon O. Extreme Adaptive Optics [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2018, 56: 315-370.

[3] Macintosh B. Discovery and spectroscopy of the young jovian planet 51 Eri b with the Gemini planet imager [J]. *Science*, 2015, 350(6256): 64-67.

[4] Jovanovic M, Martinache F, Guyon O, et al. The Subaru coronagraphic extreme adaptive optics system: enabling high-contrast imaging on solar-system scales [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(955): 890-910.

[5] Beuzit J, Vigan A, Mouillet D, et al. SPHERE: the exoplanet imager for the very large telescope [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2019, 631(155): 1-36.

[6] Dekany R, Roberts J E, Burruss R, et al. PALM-3000: Exoplanet. Adaptive optics for the 5 m hale telescope [J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 776(2): 130-143.

[7] Males J R, Close L M, Guyon O, et al. The path to visible extreme adaptive optics with MagAO-2K and MagAO-X[C]//SPIE, 2016, 9909: 990952.

[8] Pedichini F, Stangalini M, Ambrosino F, et al. High contrast imaging in the visible: first experimental results at the large binocular telescope [J]. *The Astronomical Journal*, 2017, 154(2): 74-79.

[9] Deng Keran, Wei Kai, Jin Kai, et al. A hybrid pulsed Rayleigh-sodium laser guide star adaptive optics system for strong turbulence observations [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2019, 131(1005): 114501.

[10] Baranec C, Riddle R, Ramaprakash A N, et al. Robo-AO: autonomous and replicable laser-adaptive-optics and science system[C]//SPIE, 2012, 8447: 844704.

[11] Baranec C, Riddle R, Law N W, et al. Second generation Robo-AO instruments and systems[C]//SPIE, 2014, 9148: 914812.

[12] Nicholas M, Morton T D, Baranec C, et al. Robotic laser adaptive optics imaging of 715 Kepler exoplanet candidates using Robo-AO [J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 791(1): 35-53.

[13] Lamman C, Baranec C, Bertathompson Z K, et al. Robo-AO dwarf multiplicity survey: catalog [J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 159(4): 139-155.

[14] Chin J, Wizinowich P, Wetherell E, et al. Keck II laser guide star AO system and performance with the TOPTICA/MPBC laser[C]//SPIE, 2016, 9909: 99090S.

[15] Wei Kai, Li Min, Chen Shanqiu, et al. First light for the sodium laser guide star adaptive optics system on Lijiang 1.8-meter telescope [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016,

- 16(12): 183-188.
- [16] Wei Kai, Li Min, Jiang Changchun, et al. LGS adaptive optics system with long-pulsed sodium laser on Lijiang 1.8-meter telescope 2014-2016 observation campaign[C]//SPIE, 2016, 9909: 99095G.
- [17] Fusco T, Rousset G, Sauvage J F, et al. High-order adaptive optics requirements for direct detection of extrasolar planets: Application to the SPHERE instrument [J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7515-7534.
- [18] Sauvage J F, Mugnier L, Rousset G, et al. Analytical expression of long-exposure adaptive-optics-corrected coronagraphic image first application to exoplanet detection [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(11): 157-170.
- [19] Conan R. Object-oriented Matlab adaptive optics toolbox[C]//SPIE, 2014, 9148: 91486C.
- [20] Veran J, Rigaut F, Maitre H, et al. Estimation of the adaptive optics long-exposure point-spread function using control loop data [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(11): 3057-3069.
- [21] Lardièrè O, Carillet M, Riccardi A, et al. The Dome C: A unique site for high-contrast imaging and extrasolar planetsearching with a large telescope [J]. *EAS Publications Series*, 2005, 14: 291-296.
- [22] Zieger C, Law N W, Baranec C, et al. The Robo-AO KOI Survey: laser adaptive optics imaging of every Kepler exoplanet candidate[C]//SPIE, 2016, 9909: 99095U.