

基于CHES卫星的模拟观测与轨道反演*

暴春晖^{1,2,3} 季江徽^{1,2,3†} 谭东杰^{1,2,3} 晋升^{1,2,3}
黄秀敏^{1,2,3} 王素^{1,2,3} 陈果^{1,2,3} 董瑶^{1,2,3} 刘佳成⁴

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

(3 中国科学院行星科学重点实验室 南京 210023)

(4 南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

摘要 迄今为止, 视向速度法与凌星法发现了绝大多数系外行星, 天体测量法与之相比在行星轨道参数和质量确定等方面具有独特优势. 近邻宜居行星巡天计划(Closeby Habitable Exoplanet Survey, CHES)拟基于微角秒级空间天体测量方法搜寻太阳系近邻(距离太阳约10 pc)的100颗类太阳型恒星周围的宜居带类地行星; 开展近邻行星系统的全面普查, 获取行星真实质量和三维轨道参数, 建立完备的近邻系外行星数据库. 基于CHES卫星的观测模式与科学目标, 针对Alpha Centauri A、模拟太阳系系统、51 Peg与黑洞Cyg X-1进行了模拟观测, 生成了天体测量仿真数据, 使用Lomb-Scargle与贝叶斯信息准则(Bayesian information criteria, BIC)两种周期谱分析行星轨道周期信号, 并采用Markov Chain Monte Carlo (MCMC)算法对行星系统进行轨道反演, 获得的结果与行星初始参数吻合. 进一步讨论了参考星周围存在的巨行星对于宜居行星探测的影响, 利用BIC周期谱方法可识别周围可能存在行星的参考星.

关键词 天体测量学; 行星与卫星; 探测, 类地行星; 方法: 数值

中图分类号: P144; **文献标识码:** A

1 引言

自1995年Mayor等人通过视向速度法发现第一颗围绕主序星公转的系外行星51 Peg b以来^[1], 今天文学家利用视向速度与凌星法等发现了5300多颗系外行星. 早期系外行星主要由视向速度法发现, 包括HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher)^[2]、ELODIE^[3]、ESPRESSO (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations)^[4]在内的视向

速度设备发现了1000余颗系外行星. 2009年美国航空航天局(NASA)发射了Kelper卫星及后续的K2任务采用凌星法发现了3000余颗系外行星^[5-6]. T-ESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)卫星于2018年发射, 采用凌星法对全天区进行观测, 目前已发现了300余颗系外行星与4000多个系外行星候选体^[7].

天体测量法与视向速度法和凌星法相比, 其优势在于可细致刻画行星的三维轨道(包括倾角 i 在内的轨道根数)与真实质量. 对于多行星系统, 天体测

2023-04-24收到原稿, 2023-05-10收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12033010、11773081), 中国科学院空间科学先导专项(XDA15020800), 小行星基金会资助

†jjjh@pmo.ac.cn

量法可获得各行星之间的相对倾角,这对研究系外行星系统的形成演化具有重要意义.此外,视向速度法和凌星法对行星的轨道构型具有更多选择效应:凌星法要求行星轨道为edge on (轨道倾角 i 接近 90°);而视向速度法更倾向于发现短周期、低偏心率或长周期、高偏心率的行星^[8],如图1中上图给出了所有已发现行星的轨道倾角分布,可以看出由于选择效应,绝大部分行星的倾角都在 90° 左右.下图为视向速度法发现的行星偏心率分布与理论上行星的偏心率分布^[9].而天体测量法容易观测到低偏心率的行星系统,对轨道倾角的依赖并不明显^[10];视向速度法容易受到目标星自转及表面黑子、耀斑、非径向对流、米粒组织等因素影响^[11-12],而天体测量法对恒星类型、自转与活动性要求较低^[13];双星系统在宇宙中普遍存在,而同一视场中的双星可提供更多的光子数从而减小光子噪声,且双星可以自然地限制天体测量坐标,因此天体测量法更适合在双星系统中探测系外行星^[14].

2013年,欧空局成功发射了高精度天体测量卫星Gaia,在DR3数据中公布了通过天体测量法新发现的64颗行星^[15],并预计在10 yr任务中可发现约70000颗行星^[16].除Gaia外,还有许多提出的天体测量空间计划,包括SIM (Space Interferometry Mission)^[17-18]、NEAT (Nearby Earth Astrometric Telescope)^[19-20]、Theia^[14]、MASS (The Micro-arcsecond Astrometry Small Satellite)^[21].我国提出了近邻宜居行星巡天计划(Closeby Habitable Exoplanet Survey, CHES),与Gaia的巡天观测模式不同,CHES以太阳系近邻10 pc内的约100颗FGK型恒星为主要探测目标,预计在5 yr任务中可发现数十颗宜居带内类地行星^[22-23].

本文第2节介绍CHES相关技术指标与天体测量法探测系外行星的原理,给出模拟数据的生成与处理方法;第3节针对CHES的科学目标,给出了4个具体的算例(Alpha Centauri A、模拟太阳系系统、51 Peg与Cyg X-1),开展行星轨道参数反演研究;第4节对天体测量法探测系外行星中的问题进行讨论;第5节为总结与展望.

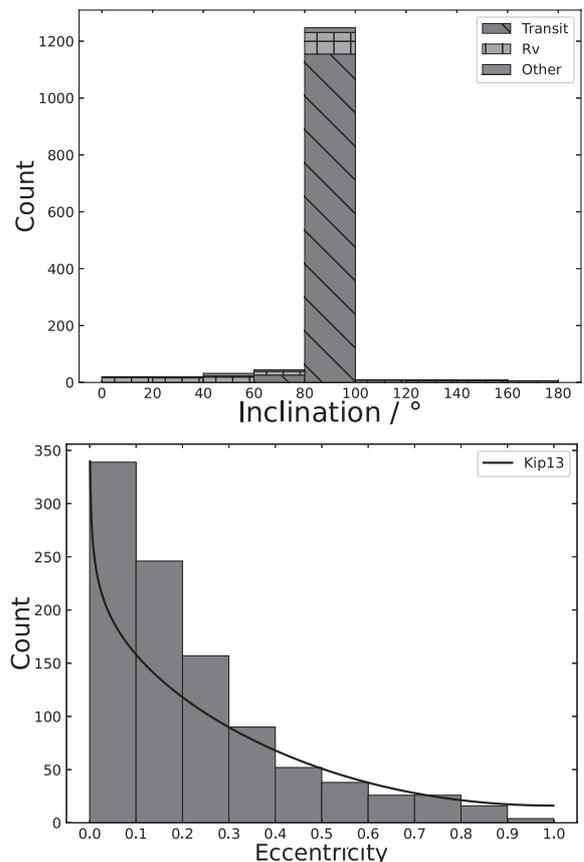


图1 上图:已探测到的系外行星的轨道倾角分布;下图:视向速度法发现的系外行星偏心率分布,实线(Kip13)为偏心率理论分布的概率密度曲线^[9].数据来源于NASA Exoplanet Archive.

Fig. 1 Above: Distribution of orbital inclination of detected exoplanets; Below: Distribution of eccentricity of exoplanets detected by radial velocity method. The solid line (Kip13) is the probability density curve of the eccentricity^[9]. The data came from NASA Exoplanet Archive.

2 天体测量法探测系外行星

2.1 CHES卫星信息及观测模式

CHES卫星采用相对天体测量方法,通过测量获得目标星与远处数颗参考星(1000 pc以外)之间的相对位置.与传统天体测量法相比,CHES的观测数据通常不会引入星表误差.为实现对太阳系近邻10 pc内的类太阳型恒星周围的宜居带类地行星的探测,任务中的单次探测精度需达到 $1 \mu\text{as}$ 量级.表1列举了CHES任务的基本参数^[22].

表 1 CHES任务参数
Table 1 Parameters of CHES mission

Parameter	Value
Field of view	$0.44^\circ \times 0.44^\circ$
Number of reference stars	6–8
Mission duration	5 yr
Number of observations	30–200
Aperture	1.2 m
Exposure time	0.5–2 h
Wavelength	500–900 nm

行星对恒星引起的天体测量信号强度 α 为^[24]:

$$\alpha = \frac{M_p}{M_s + M_p} \frac{a}{d}$$

$$\approx 3 \left(\frac{M_p}{M_\oplus} \right) \left(\frac{M_s}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{a}{1 \text{ au}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ pc}} \right)^{-1} \mu\text{as}, \quad (1)$$

其中 a 为行星的轨道半长径, 可以确定行星轨道周期 P ; d 为恒星与太阳之间的距离; M_s 与 M_p 分别为恒星与行星质量, M_\odot 与 M_\oplus 分别为太阳与地球质量. 对于与地球质量、轨道半长径相同, 距离太阳10 pc的行星, 其产生的天体测量信号强度为 $0.3 \mu\text{as}$. 考虑到行星系统的待解参数和测量次数以及信噪比, 为了探测到宜居带的类地行星, 任务中提出单次测量精度达到 $1 \mu\text{as}$ 量级. 在CHES任务中, 测量误差主要来源于以下几项: 对目标星与参考星的定位误差、望远镜误差及探测器校准误差^[22]. 其中定位误差源于光子噪声, 为影响天体测量精度最主要因素, 这里可用均值为0, 标准差为 σ_p 的高斯噪声表示, σ_p 根据下式计算^[22]:

$$\sigma_p = \frac{\lambda}{2D} \frac{1}{\sqrt{N_p t_{\text{vis}}}}, \quad (2)$$

式中 D 为CHES主镜口径, λ 为工作波长700 nm, N_p 为单位时间内探测器接收的光子数, t_{vis} 为曝光时间. 对于一颗13等星, CHES探测器预计经2 h曝光后, 可接收的光子数为 1.6×10^9 . 望远镜误差 σ_t 、探测器校准误差 σ_c 及恒星活动性等其他可能存在的干扰 σ_s 在内的其余误差项, 分别为 $0.36 \mu\text{as}$ 、 $0.74 \mu\text{as}$ 与 $0.24 \mu\text{as}$ ^[22]. 单次测量精度 σ_0 为上述各项的叠加, 体现为在天球切平面上赤经(RA)、赤纬(DEC)两个方向上的均值为0和标准差为 σ_0 的高斯噪声 ϵ_η 、 ϵ_δ . 则CHES的观测信噪比可以表示为^[17]:

$$\text{SNR} = \frac{\alpha}{\sigma_0} N_{\text{vis}}^{1/2}, \quad (3)$$

其中 N_{vis} 为5 yr内的总观测次数.

本文选取视场内亮于13等, 且自行尽量小的恒星作为参考星. 针对不同的观测目标星, 所需的观测次数亦有差异. 设定探测目标行星位于宜居带中心, 质量为 $1.5 M_\oplus$. 对于特定的目标星, 宜居带内行星轨道半长径与目标星光度及有效温度等物理特性有关, 本文采用了Kopparapu的Runaway Greenhouse模型和Maximum Greenhouse模型的宜居带距离 d_{HZ} 作为内外边界, 表2给出了系数 a_{ko} 、 b_{ko} 、 c_{ko} 、 d_{ko} 的取值^[25]:

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + a_{\text{ko}}(T - T_\odot) + b_{\text{ko}}(T - T_\odot)^2 + c_{\text{ko}}(T - T_\odot)^3 + d_{\text{ko}}(T - T_\odot)^4,$$

$$d_{\text{HZ}} = \sqrt{\frac{L/L_\odot}{S_{\text{eff}}}} \text{ au}, \quad (4)$$

表 2 宜居带模型系数^[25]
Table 2 Coefficients of habitable zone models^[25]

Model	$S_{\text{eff}\odot}$	a_{ko}	b_{ko}	c_{ko}	d_{ko}
Runaway Greenhouse	1.107	1.332×10^{-4}	1.58×10^{-8}	-8.308×10^{-12}	-1.931×10^{-15}
Maximum Greenhouse	0.356	6.171×10^{-5}	1.698×10^{-9}	-3.198×10^{-12}	-5.575×10^{-16}

(4)式中 S_{eff} 为恒星有效通量, T 为恒星有效温度, L 为恒星光度, 下标 \odot 表示太阳的相应参数值. 公式中需要的恒星有效温度与光度参数及(1)式中的恒星质量由Gaia的Apsis模型给出^[26]. 研究表明信噪比达到6的情况下, 可探测到目标星周围的行星^[27]. 根据(2)式与(3)式可知, 信噪比由曝光时间与观测次数决定, 本文将曝光时间设定为满足来自参考星的总光子数与对8颗13等星曝光2 h的情况相当, 进而确定对各个目标星的观测次数. 由于总观测时长有限, 且每次观测前需要约2.5 h的校准时间^[22], 设定观测次数最多为200次, 对更暗更远的目标通过延长单次曝光时间来提高测量精度. 由于一颗拥有 p 颗行星的恒星在天球上投影的运动可由 $5+7p$ 个参数决定, 如果要确定一颗行星及其宿主恒星的12个参数, 那么5 yr内至少需观测12组数据才能求解; 对拥有2到3颗行星的系统, CHES对目标星最少需观测30次.

2.2 天体测量原理

由于行星的摄动, 目标星绕系统的公共质心作椭圆运动, 为了模拟从观测而得的相对天体测量信号, 需要将行星椭圆轨道运动投影到观测平面上. Kepler轨道根数在小偏心率、低倾角的情况下会发生耦合, 需要将Kepler轨道根数(行星升交点经度 Ω 、近星点幅角 ω 、 i)化为Thiele-Innes轨道根数 A 、 B 、 F 、 G 并将各历元时刻的偏近点角 E 转换为Thiele-Innes坐标系下的 X 、 Y ^[28]:

$$\begin{cases} A = \alpha(\cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \cos i), \\ B = \alpha(\sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos i), \\ F = \alpha(-\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos \omega \cos i), \\ G = \alpha(-\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos \omega \cos i), \\ X(t) = \cos E(t) - e, \\ Y(t) = \sqrt{1 - e^2} \sin E(t), \\ E(t) - e \sin E(t) = \frac{2\pi t}{P} - M_0, \end{cases} \quad (5)$$

上式中 e 为行星偏心率, M_0 为行星初始时刻的平近点角. 对于单颗行星, t 时刻恒星在天球切平面上赤经和赤纬方向的理论变化值可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\eta(t) &= AX(t) + FY(t), \\ \Delta\delta(t) &= BX(t) + GY(t). \end{aligned} \quad (6)$$

假设各参考星与目标星的自行与视差已知, 实际观测得到的目标星与某颗参考星的相对位置变化为:

$$\begin{aligned} \Delta\eta' &= \Delta\eta + \epsilon_\eta + \epsilon, \\ \Delta\delta' &= \Delta\delta + \epsilon_\delta + \epsilon, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 ϵ 为未知误差, 如目标星或参考星周围其他行星的干扰. 若系统中存在多颗行星, 在不考虑行星之间相互引力作用的情况下, 认为恒星位置的总变化量为各颗行星单独引起变化量的线性叠加. 对给定的行星系统生成相应的模拟观测数据, 共包含7个行星参数(P 、 e 、 i 、 Ω 、 ω 、 M_0 、 M_p), 由(1)式以及(5)–(7)式可得到给定观测时间序列内目标星的赤经赤纬变化.

2.3 周期谱分析及轨道拟合

在获得时序观测数据后, 一般采取基于快速傅里叶变换的LS (Lomb-Scargle)周期谱算法寻找数据中的周期性信号^[29]或使用改进的GLS (Generalized Lomb-Scargle)算法^[30]. 而在行星周期长于观测时标的情况下, 欠采样问题导致此类算法无法得到行星的周期. 除LS周期谱算法外贝叶斯方法被广泛用于周期分析或判断系统是否存在行星的工作中^[31–33]. 本文采用贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criteria, BIC)作为判据, 获得周期谱. BIC值本身不具备统计意义, 因此需比较模型各自的BIC值, 该值越小表征模型与真实情况越吻合. BIC值由下式计算^[34]:

$$\text{BIC} = k \ln(N_{\text{vis}}) - 2 \ln \mathcal{L}, \quad (8)$$

式中 k 为模型中自由参数个数, $\ln \mathcal{L}$ 为对数似然函数, 可以看出BIC判据偏向于更简单的模型. 天体测量数据拟合中的似然函数为^[35]

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= A_0 \exp \left\{ - \sum_{j=1}^{N_{\text{vis}}} \frac{[\Delta\eta'(t_j) - \Delta\eta(t_j)]^2}{2[\epsilon_\eta(t_j)^2 + \epsilon^2]} \right\} \times \\ &\exp \left\{ - \sum_{j=1}^{N_{\text{vis}}} \frac{[\Delta\delta'(t_j) - \Delta\delta(t_j)]^2}{2[\epsilon_\delta(t_j)^2 + \epsilon^2]} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$A_0 = (2\pi)^{-N_{\text{vis}}} \prod_{j=1}^{N_{\text{vis}}} [\epsilon_{\eta}(t_j)^2 + \epsilon^2]^{-1/2} \prod_{j=1}^{N_{\text{vis}}} [\epsilon_{\delta}(t_j)^2 + \epsilon^2]^{-1/2}. \quad (10)$$

在进行BIC周期谱分析时首先定义轨道周期网格以进行采样, 在100 d到25 yr范围内, 设置相邻节点之间的频率间隔为 df/N_{over} , 其中 τ 为任务总时长5 yr、 N_{over} 为过采样因子, $df = \frac{1}{2\pi\tau}$ 为LS周期谱中最短频率间隔^[29]. 在长周期范围内(5 yr到25 yr)设置过采样因子为3, 短周期范围内(100 d到5 yr)设置过采样因子为1. 首先对于每个周期节点, 固定偏心率与未知误差 ϵ 为0, 利用MCMC方法对剩余的5个行星参数(i 、 Ω 、 ω 、 M_0 、 M_p)进行拟合.

MCMC算法的原理为贝叶斯定理, 对于给定的模型 M 与观测数据 O , 未知参数 θ 的后验概率分布为:

$$p(\theta | O, M) = \frac{p(O | \theta, M)p(\theta | M)}{p(O | M)}, \quad (11)$$

其中 $p(O | \theta, M)$ 是数据 O 的似然, $p(\theta | M)$ 是 θ 的先验分布, $p(O | M)$ 为贝叶斯判据. 本文中设定 M_p 与 P 的先验为Jeffreys分布, 其他参数为均匀分布^[36]. 轨道拟合过程即为通过MCMC采样方法估计未知参数的后验概率分布^[37-38]. 对周期网格中每个节点都获得相应的 $\ln \mathcal{L}$ 与BIC值后, 认为最小BIC值所对应的周期节点存在一颗行星, 并以其拟合结果作为先验, 对行星的全部7个参数及未知误差 ϵ 进行拟合.

2.4 联合视向速度法求解轨道

在对Kepler轨道根数转换时, (5)式中同一组Thiele-Innes轨道根数对应 Ω 和 ω 存在 $\pm\pi$ 的不确定性^[39-40]. 利用天体测量法与视向速度法联合求解行星轨道参数, 可唯一确定 Ω 和 ω .

行星导致的恒星视向速度变化可以表示为:

$$RV = K [\cos(f + \omega) + e \cos \omega], \quad (12)$$

其中 K 为视向速度幅值, f 为行星轨道真近点角, 可由以下两式得出

$$K = \left(\frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_s + M_p)^{2/3}} \frac{1}{(1 - e^2)^{1/2}}, \quad (13)$$

$$\tan \frac{f}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E}{2}, \quad (14)$$

其中 G 为引力常数, 结合视向速度同时拟合时, 天体测量参数与视向速度参数存在等式关系^[41]:

$$\frac{\alpha \sin i}{\varpi} = \frac{PK\sqrt{1-e^2}}{2\pi}, \quad (15)$$

其中 ϖ 为目标星的视差. 并在似然函数中加入视向速度的对应项(下标rv)^[42]

$$\ln \mathcal{L}_{\text{rv}} = -\frac{1}{2} \left[\frac{(\text{RV}_o + \text{RV}_{\text{off}} - \text{RV}_c)^2}{\sigma_{\text{rv}}^2} + \ln 2\pi\sigma_{\text{rv}} \right], \quad (16)$$

式中 RV_o 、 RV_c 分别为观测视向速度与理论视向速度, RV_{off} 为设备的视向速度偏移值, σ_{rv} 为观测误差. 最终拟合采用的对数似然函数为 $\ln \mathcal{L}_{\text{rv}}$ 与 $\ln \mathcal{L}$ 之和.

3 CHES科学目标及算例

本文基于CHES的科学目标选取了4个系统作为算例: Alpha Centauri A、模拟太阳系系统、51 Peg与Cyg X-1, 来检验轨道反演算法的可靠性. 假设5 yr内的观测时刻是均匀分布的, 本文暂不考虑有关参考星与目标星天体测量坐标确定等数据预处理过程, 并假设各恒星的视差与自行数据在拟合过程中不变.

3.1 单行星系统探测: Alpha Centauri A

Alpha Centauri A位于半人马座, 与Alpha Centauri B、Proxima组成三合星系统, 距地球1.34 pc, 是距离我们最近的恒星系统, 也是CHES的观测目标之一. Alpha Centauri A为G2 V型恒星, 质量约 $1.06 M_{\odot}$, 视星等为0.01, 在视场内选取1000 pc外8颗最亮的参考星, 并设定曝光时间0.5 h, 在5 yr观测30次, 相应的单次观测精度为 $1.2 \mu\text{as}$ 进行模拟观测.

由于Alpha Centauri A周围尚未发现行星, 我们假设一颗质量为 $3 M_{\oplus}$ 、轨道周期为300 d的行星Alpha Centauri Ab, 处于宜居带的内边界, 相应的天体测量信号强度为 $5.6 \mu\text{as}$. 且Alpha Centauri双星轨道周期为79.91 yr, 远长于任务总时长, 另一颗恒星引力作用的影响可以忽略^[43]. 由2.2节获得模拟的Alpha Centauri A天体测量数据后, 首先对数据进行周期谱分析. 图2给出了模拟数据的周期谱分析结果, 可以看出, LS、BIC周期谱均可发现时序数据中存在298 d左右的周期, 表明系统中有行星的存在. 继续对全部参数进行MCMC拟合, 结果在表3中列出, 其中 σ 为各参数拟合误差. 各个参数拟合结果与设定的真值都很接近. 图3为归一化天体测量拟合曲线及拟合残差, 在残差中没有发现周期性信号.

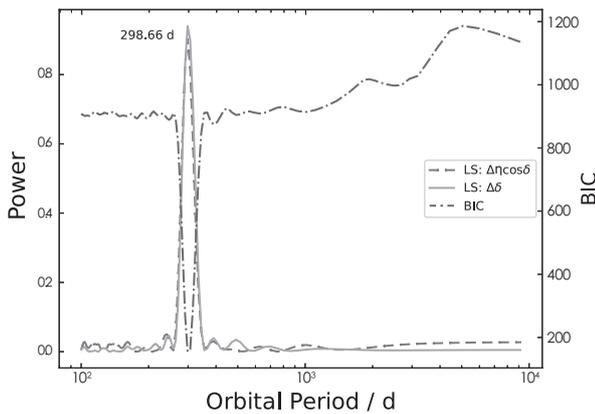


图2 Alpha Centauri A的模拟天体测量数据的LS、BIC周期谱, 均存在298 d左右的周期信号.

Fig. 2 LS periodogram and BIC periodogram of Alpha Centauri A. A 298-day period exists in the periodogram.

3.2 双行星系统探测: 模拟太阳系系统

在宇宙中多行星系统是普遍存在的, 因此需要考虑系统中其他行星对探测类地行星的干扰. 假设距我们10 pc外存在一个包含太阳、地球与木星的类太阳系系统. 为减少行星轨道倾角与升交点经度的耦合性, 设定模拟行星的轨道倾角相比真值增加了 30° , 其他参数与真值一致. 地球、木星引起的信号强度分别为 $0.3 \mu\text{as}$ 、 $496 \mu\text{as}$, 加入单次观测误差 $1 \mu\text{as}$ (假定曝光时间2 h). 对此系统产生模拟天体

测量数据并进行轨道反演. 模拟观测共进行200次, 总时长5 yr.

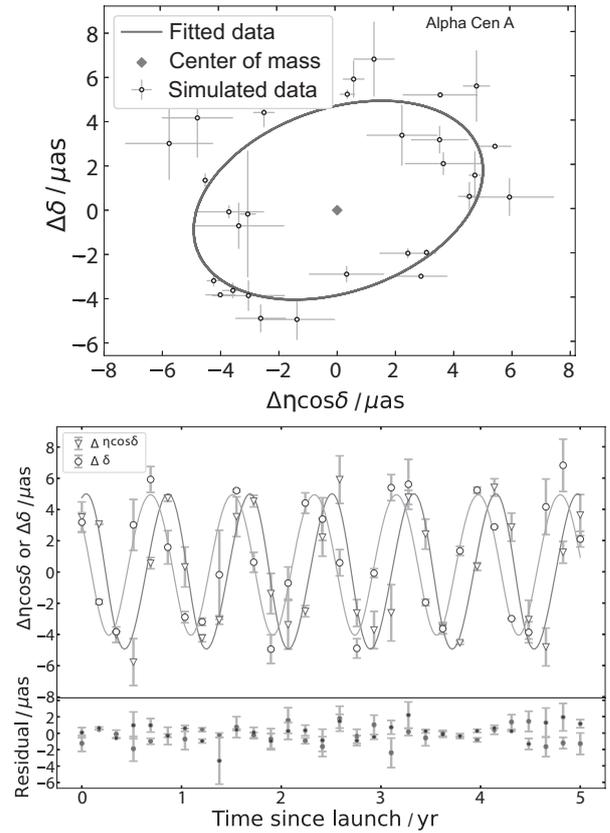


图3 上: Alpha Centauri A的天体测量拟合曲线; 下: Alpha Centauri A分别在赤经、赤纬两个方向上的拟合曲线和残差.

Fig. 3 Above: The astrometric curve of Alpha Centauri A; Below: The astrometric curve and residuals of Alpha Centauri A in RA and DEC.

首先采用LS周期谱与BIC周期谱两种方法寻找天体测量数据中的周期, 图4为两种方法获得的周期谱, 由于木星周期约12 yr, 远长于观测总时长, LS周期谱未能出现峰值, 而BIC周期谱方法可以发现存在约4418 d的周期信号, 为周期网格中最接近木星真实周期(约4331 d)的值. 然而由于木星产生的信号强度远远强于地球, 两种周期谱方法都不能发现地球的周期信号, 因此初步认为系统中仅存在单颗行星, 以BIC周期谱的拟合结果为先验, 进行MCMC单Kepler拟合.

表 3 Alpha Centauri Ab的拟合参数
Table 3 The fitting parameters of Alpha Centauri Ab

	True Value	Fitted Value	σ
M_p/M_\oplus	3.0	2.91	0.10
P/d	300.0	300.2	0.99
$\Omega/^\circ$	50.0	54.6	5.05
$\omega/^\circ$	120.0	121.4	12.66
$M_0/^\circ$	110.0	107.5	20.52
e	0.100	0.102	0.0265
$i/^\circ$	45.6	43.9	3.97
$\alpha/\mu\text{as}^*$	5.63	5.47	\

* α is calculated by Eq.(1), has no fitting error.

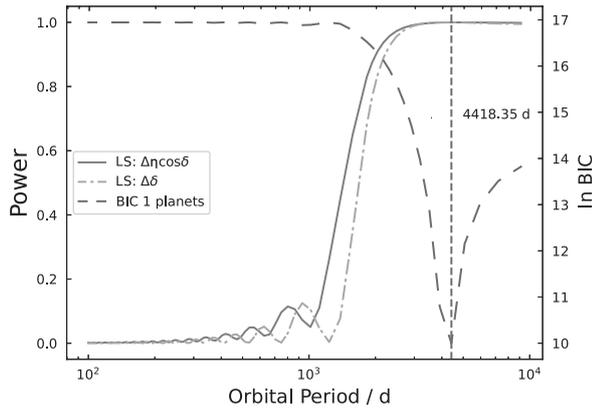


图 4 模拟太阳系系统的模拟天体测量数据的LS、BIC周期谱, 右侧纵坐标表示BIC的对数值. BIC周期谱中存在4418 d左右的周期信号.

Fig. 4 The LS and BIC periodogram of the astrometric data of the simulation solar system, the right y-axis represents logarithmic value of BIC, and the BIC periodogram have a periodic signal about 4418 d.

由于地球的信号强度相比木星过于微弱, 初次拟合只获得了木星轨道参数, 并可以发现残差中存在长周期的趋势性. 从(5)式可以看出, 当 α 很高, 且拟合值 Ω 与 ω 接近于 90° 或 270° 时, Thiele-Innes根数对 Ω 、 ω 的变化十分敏感, 尽管初次拟合所得的参数已经十分接近真值, 但仍存在 $\sim 10 \mu\text{as}$ 的长周期性残差. 因此仅以Thiele-Innes根数为变量,

以MCMC拟合结果为初值, 采用Nelder-Mead算法对数据进行 χ^2 最小化拟合, 再由Thiele-Innes根数反解得到Kepler轨道根数, 各拟合结果在表4中给出, 其中 λ 为平经度, 等于 Ω 、 ω 与 M_0 之和, 更多用于描述低偏心率的轨道构型. 表4给出了两种拟合方法得到的结果, 尽管某些参数的拟合值与真值差距变大, 但图5中可以明显发现二次拟合得到的残差大大减小了, 说明 λ 对天体测量信号影响更大. 单Kepler方法的拟合结果如图6所示.

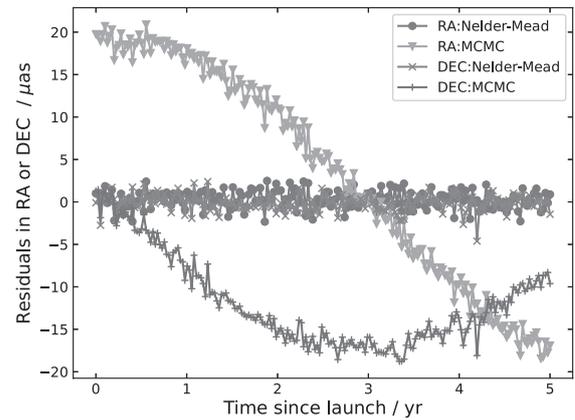


图 5 MCMC与Nelder-Mead拟合得到的残差

Fig. 5 Residuals from MCMC and Nelder-Mead fitting

表 4 单Kepler拟合参数

Table 4 Parameters from single Kepler fitting

	True Value	MCMC	Nelder-Mead	σ
M_p/M_\oplus	317.828	317.775	317.742	0.062
P/yr	11.872	11.868	11.868	0.026
$\Omega/^\circ$	100.492	100.546	100.617	2.88
$\omega/^\circ$	275.0663	272.456	274.687	1.87
$M_0/^\circ$	18.7767	18.575	18.7767	1.54
e	0.04877	0.04848	0.04848	0.018
$i/^\circ$	31.305	31.3157	31.2923	13.77
$\alpha/\mu\text{as}^*$	496.18	496.01	495.96	\
$\lambda/^\circ^*$	34.334	31.577	34.081	\

* α is calculated by Eq.(1), $\lambda = \omega + \Omega + M_0$, has no fitting error.

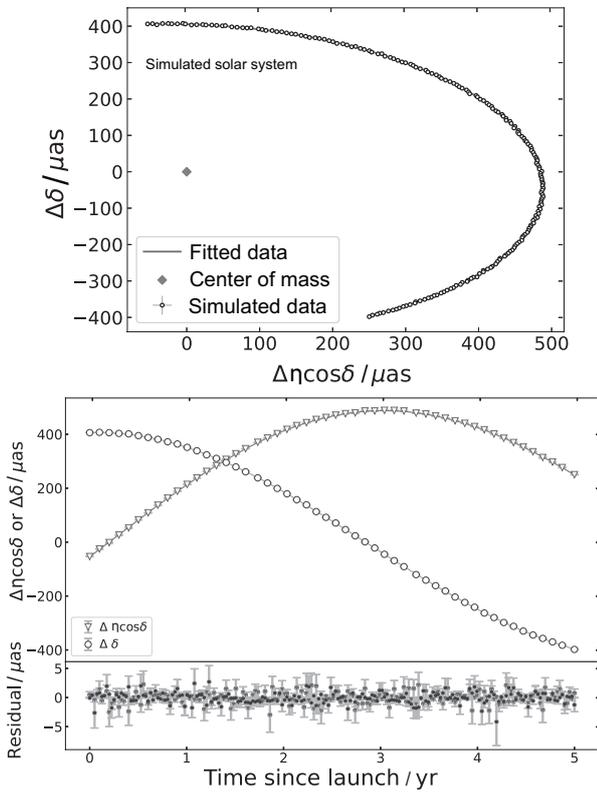


图 6 上: 模拟太阳系中恒星的单Kepler天体测量拟合曲线; 下: 模拟太阳系中恒星在赤经、赤纬两个方向上的拟合曲线和残差.

Fig. 6 Above: The astrometric curve of Sun in the simulated solar system from single Kepler fitting; Below: The astrometric curve and residuals of Sun in RA and DEC.

单Kepler拟合获得的未知误差 ϵ 为 $0.21 \mu\text{as}$, 图7给出了对单Kepler拟合残差周期谱分析的结果, 可以看出在残差中存在两种周期信号, 表征可能仍存在第二颗待拟合行星. 由于残差与噪声强度相当, 为了提高拟合精度, 认为系统存在两颗行星, 忽略二者之间的相互作用, 对两颗行星的轨道同时进行双Kepler拟合, 表5给出了两颗行星的双Kepler拟合参数, 其中 ϵ 小于 $0.01 \mu\text{as}$, 因此可以认为系统中不存在第三颗行星. 图8为两颗行星单独引起的恒星摆动的天体测量拟合曲线. 通过双Kepler拟合得到的地球周期与真值接近, 质量与真值相差10%以内, 说明在系统中存在类木星这样的强天体测量信号源的情况下, CHES仍可以探测到类地行星. 并且若CHES的任务时长超过预计的5 yr, 对长周期冷木星的探测能力会进一步提高.

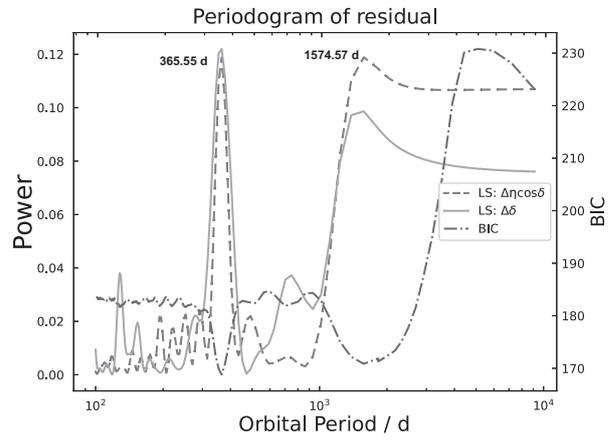


图 7 单Kepler拟合后残差的周期图

Fig. 7 Periodogram of residuals from single Kepler fitting

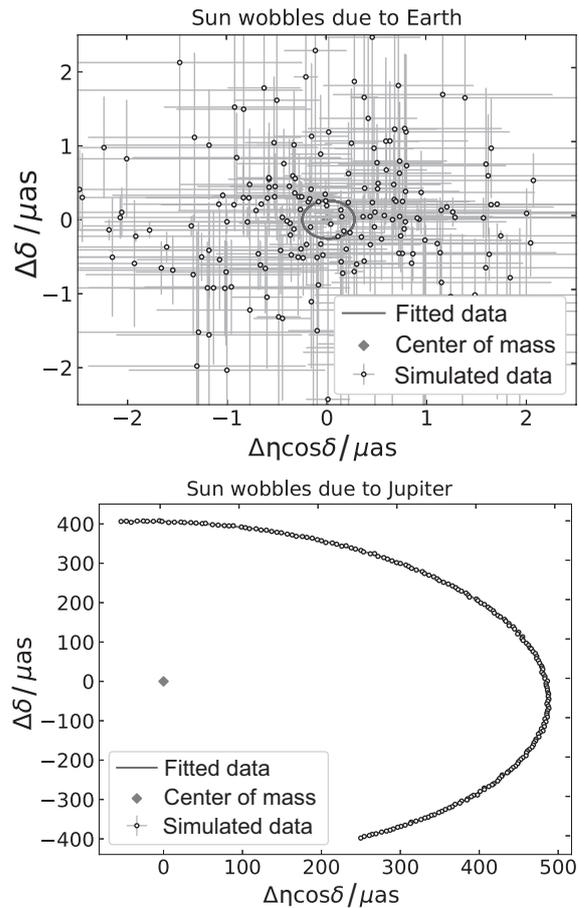


图 8 模拟太阳系中地球与木星的双Kepler拟合天体测量曲线

Fig. 8 The astrometric curve of Earth and Jupiter from double Kepler fitting

表 5 双Kepler拟合参数
Table 5 Parameters from double Kepler fitting

	Earth			Jupiter		
	True Value	Fitted Value	σ	True Value	Fit Value	σ
M_p/M_\oplus	1.00	0.913	0.38	317.828	317.818	0.18
P/yr	1.00	1.004	0.006	11.868	11.867	0.0075
$\Omega/^\circ$	163.975	85.121	4.0	100.492	100.519	0.45
$\omega/^\circ$	297.767	181.214	9.5	275.066	274.658	0.51
$M_0/^\circ$	358.189	156.670	9.0	18.777	18.434	0.42
e	0.01704	0.0555	0.050	0.0485	0.0486	0.0022
$i/^\circ$	30.0003	20.638	7.4	31.305	31.289	0.24
$\alpha/\mu\text{as}^*$	0.300	0.275	\	496.18	496.05	\
$\lambda/^\circ^*$	99.931	63.005	\	34.334	33.611	\

* α is calculated by Eq. (1), $\lambda = \omega + \Omega + M_0$, has no fitting error.

3.3 热木星质量的测定: 51 Peg b

由于视向速度法的限制, 许多行星的真实质量仍是未知的, 结合天体测量方法可以获得这类行星的真实质量与轨道构型^[44], 或者发现新的行星^[45]. 本文以51 Peg b为算例讨论联合视向速度与天体测量两种方法来测定行星质量. 51 Peg为G型主序星, 距离太阳系约15.45 pc, 其周围的51 Peg b是一颗热木星, 轨道周期约4.2 d, 最小质量约为 $150 M_\oplus$ ^[1], Martins等人通过分离光谱中恒星信号的方法, 约束51 Peg b的轨道倾角为 $80^\circ_{-19}^{+10}$ ^[46]. 由于目前尚未观测发现51 Peg存在凌星现象, 本文假定51 Peg b的轨道倾角为 60° . 51 Peg在视场范围内存在9颗1000 pc以外的参考星, 可作为CHES拓展任务的观测目标.

在模拟观测中, 对51 Peg在10 d内进行30次观测, 51 Peg b相应的质量约 $170 M_\oplus$, α 为 $1.3 \mu\text{as}$, 偏心率等轨道参数来自于California Legacy Survey^[34]. 由此可生成仿真天体测量数据, 并结合Lick 13实测视向速度数据^[47], 利用两种不同类型的数 据同时进行轨道拟合. 考虑到大多数热木星的周期已知, 本文并未对数据进行周期谱分析, 而直接使用MCMC算法进行拟合.

拟合结果与相应的天体测量、视向速度曲线

分别在表6与图9、图10中给出. 其中 RV_{off} 的真值为Birkby的拟合结果^[47].

表 6 51 Peg b的拟合参数
Table 6 The fitting parameters of 51 Peg b

	True Value	Fitted Value	σ
M_p/M_\oplus	169.74	168.21	2.831
P/d	4.23	4.231	0.068
$\omega/^\circ$	103.4	114.45	21.011
$\Omega/^\circ$	50.7	53.28	3.880
$M_0/^\circ$	300.80	313.20	20.799
e	0.0042	0.0198	0.0205
$i/^\circ$	60.0	59.42	2.792
$\text{RV}_{\text{off}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	-21.70	-22.51	3.31
$\alpha/\mu\text{as}^*$	1.61	1.60	\
$K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^*$	55.56	54.75	\

* α (K) is calculated by Eq. (1) (Eq. (13)), has no fitting error.

3.4 探测恒星级黑洞: Cyg X-1

恒星质量分布和恒星演化理论给出, 银河系内存在 10^8 - 10^9 个恒星级黑洞^[48]. 而目前经动力学认证的恒星级黑洞仅二十余个, 且黑洞的质量分

布与理论不符, 表现为缺失低于6倍太阳质量的黑洞^[49]. 为了更好地解释此问题, 我们需要扩充样本数量. 传统方法倾向于探测密近双星或大质量恒星周围的黑洞, 通过观测吸积盘发出的强X射线辐射与光学伴星的光谱来测量黑洞的动力学质量. 而天体测量方法可以探测到更长周期的黑洞, 并避免吸积盘X射线对伴星光谱的污染, 具有独特的优势. Gaia DR3数据公布了发现的两个恒星级黑洞Gaia BH1与BH2^[50-51], 并预计可以发现数百个恒星级黑洞^[52]. CHES的科学目标同样可以对双星系统中的黑洞或黑洞候选体进行后续观测, 刻画其三维轨道与质量信息, 有助于我们更好地理解黑洞的形成.

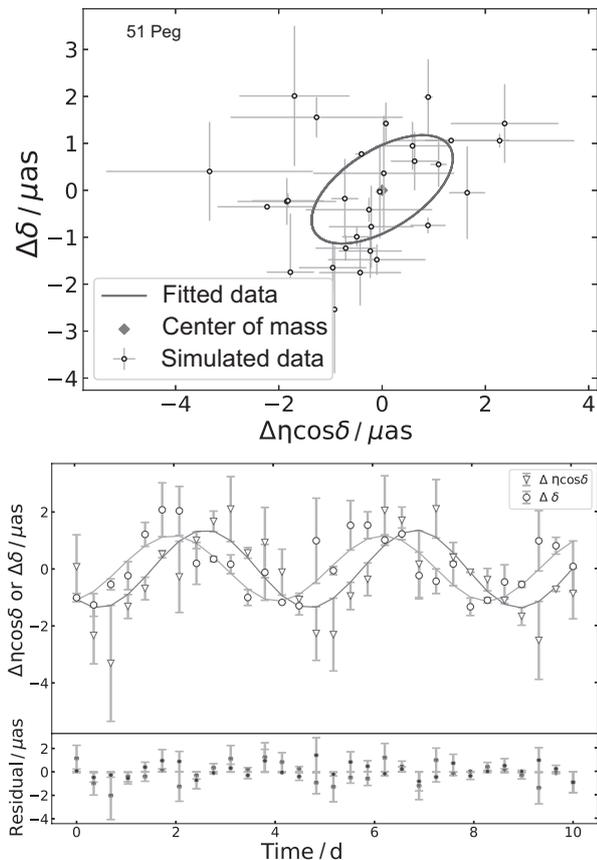


图 9 上: 51 Peg 的天体测量拟合曲线; 下: 51 Peg 在赤经、赤纬两个方向上的拟合曲线和残差.

Fig. 9 Above: The astrometric curve of 51 Peg; Below: The astrometric curve and residuals of 51 Peg in RA and DEC.

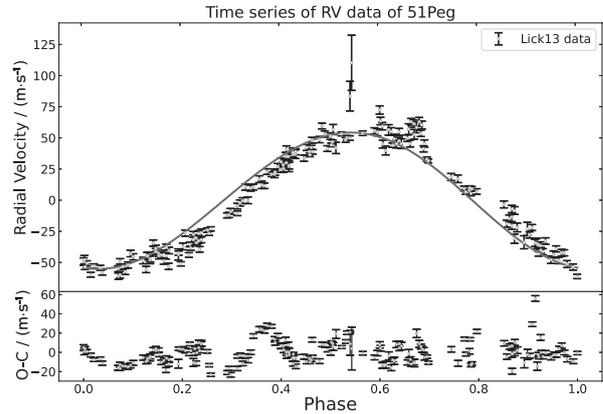


图 10 51 Peg 的视向速度归一化拟合曲线

Fig. 10 The normalized radial velocity curve of 51 Peg

本文以Cyg X-1为算例讨论天体测量法对恒星级黑洞的探测. Cyg X-1是第一个被发现的黑洞候选体, 与O型超巨星HD 226868处于密近双星系统中, 距离我们约2200 pc^[53]. 2021年该系统被证认为由质量为 $40.6 M_{\odot}$ 的恒星与质量约 $21.2 M_{\odot}$ 的黑洞组成^[54], 双星绕转周期5.6 d、恒星视星等为8.84, 相应的天体测量强度约 $76 \mu\text{as}$. 假设CHES在10 d内对Cyg X-1双星系统观测30次, 单次测量精度 $0.91 \mu\text{as}$, 生成仿真天体测量数据并进行轨道反演, 表7给出了轨道参数的拟合结果, 其中 ω 与 M_0 的真值由人为给定, 其余参数以Miller-Jones等人给出的结果作为真值^[54], 图11为拟合得到的天体测量曲线与残差, 拟合结果与真值接近.

表 7 Cyg X-1的拟合参数

Table 7 The fitting parameters of Cyg X-1

	True Value	Fitted Value	σ
M_{bh}/M_{\odot}	21.2	21.13	3.30
P/d	5.60	5.58	1.39
$\Omega/^{\circ}$	306.6	306.9	29.86
$\omega/^{\circ}$	60.0	60.12	45.18
$M_0/^{\circ}$	100.0	101.24	30.38
e	0.0189	0.0197	0.055
$i/^{\circ}$	27.51	27.70	0.27
$\alpha/\mu\text{as}^*$	50.03	50.14	\

* α is calculated by Eq.(1), has no fitting error.

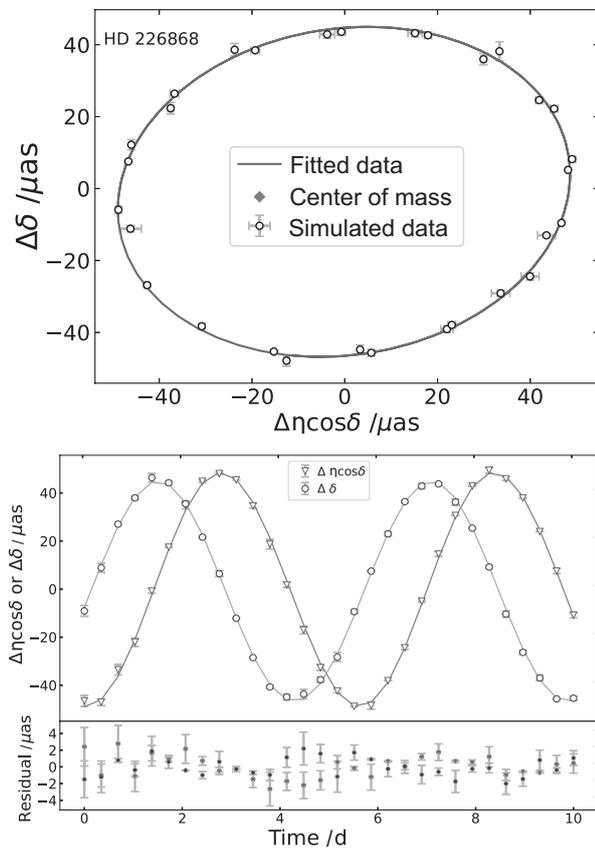


图 11 上: HD 226868的天体测量拟合曲线; 下: HD 226868在赤经、赤纬两个方向上的拟合曲线和残差.

Fig. 11 Above: The astrometric curve of HD 226868; Below: The astrometric curve and residuals of HD 226868 in RA and DEC.

4 参考星周围存在行星的影响

在相对天体测量中, 需要比较两颗恒星在焦平面上的量度坐标之差, 如果参考星周围存在行星, 同样会导致参考星绕公共质心做开普勒椭圆运动进而改变相对坐标, 影响对目标星周围行星的探测. 本文通过比较各参考星之间的相对位置变化, 确定哪一颗参考星周围存在行星, 并在后续的数据处理与轨道反演中移除此参考星以排除此影响. 由于在FGKM恒星周围0.1 au到30 au范围内, 存在巨行星的概率在10% 以内^[55], 假设参考星与目标星中仅有一颗参考星周围存在巨行星, 而目标星周围存在一颗类地行星. 由于CHES至少需要3颗参考星

才能实现对目标星的相对测量^[19], 对于个别目标星的参考星数目较少的情形, 可以在拟合过程中认为参考星周围行星产生的信号为未知误差 ϵ . 在仅存在3颗参考星的情况下, 参考星周围可能存在巨行星的概率大大降低; 且可通过后随地基视向速度观测与Gaia天体测量数据进一步排除参考星周围存在行星带来的影响, 因此本文仅以视场内存在8颗参考星的情形为例.

CHES任务中所遴选的参考星通常距离遥远 (~1000 pc), 因此仅气态巨行星对参考星产生的天体测量信号才可能对数据处理带来影响. 本文以CHES目标星之一Chi01 Ori为例, 讨论若参考星周围存在巨行星, 且其天体测量强度与目标星周围类地行星的信号强度相当时, 如何基于行星轨道反演方法测得类地行星参数. Chi01 Ori是一颗近邻类太阳型恒星, 距太阳系8.87 pc, 光谱型为G0V型, 视星等4.4, 其有效温度、质量、半径等物理参数均与太阳接近^[56-58]. 该系统对应的宜居带中心位置约为1.3 au, 相应的轨道周期为580 d. 参考星与目标星的距离及视星等(V Mag)由表8给出. 由于天体测量信号与行星、恒星质量比相关, 本文假设所有参考星质量均为一倍太阳质量, 且仅有一颗参考星周围存在行星并位于宜居带内.

表 8 Chi01 Ori参考星与目标星信息
Table 8 Chi01 Ori and reference stars

Star	Distance/pc	V Mag
Chi01 Ori	8.8699	4.4
Ref 1	929.0667303	9.933402
Ref 2	959.6461767	10.161454
Ref 3	1102.977308	11.349647
Ref 4	1272.385723	11.685939
Ref 5	1407.067816	11.716809
Ref 6	1411.390742	11.593016
Ref 7	1481.379577	11.515642
Ref 8	1483.578593	11.277475

假定在5 yr观测时间内, 参考星自行与自行高

阶项误差造成的观测值与理论值之差(O-C)均为线性^[59-60]. 参考星之间相对位置的理论值与观测值的偏差由3项构成: 参考星周围行星导致的周期变化; 恒星参数误差导致的线性变化; 观测误差引起的高斯噪声, 其标准差约 $0.94 \mu\text{as}$.

首先不妨假定其中一颗(比如第4颗)参考星周围存在一颗质量为 $160 M_{\oplus}$ 、周期为580 d的巨行星. 目标星周围同样位置处存在质量为 $1 M_{\oplus}$ 的行星, 信号强度分别为 $0.51 \mu\text{as}$ 与 $0.46 \mu\text{as}$. 首先获得每两颗参考星之间的相对位置时序数据, 通过BIC周期谱分析, 可发现并确定存在行星的参考星. 以第1颗参考星为例, 我们对其与其他7颗参考星的天体测量数据进行BIC周期谱分析. 由于BIC值本身没有统计意义, 将各组天体测量数据归一到零点进行比较. 图12给出了7组天体测量数据的周期谱分析结果, 可以看出仅第1、第4颗参考星的时序相对位置存在显著的周期性, 因此可认为其中一颗参考星周围有行星. 类似地, 图13给出第2颗参考星与其余参考星的周期谱, 其与第1颗参考星之间不存在周期性, 但与第4颗参考星存在明显的周期性. 通过对每颗参考星进行类似分析研究, 即可判断出第4颗参考星存在行星, 进而需要在后续数据处理过程中予以考虑.

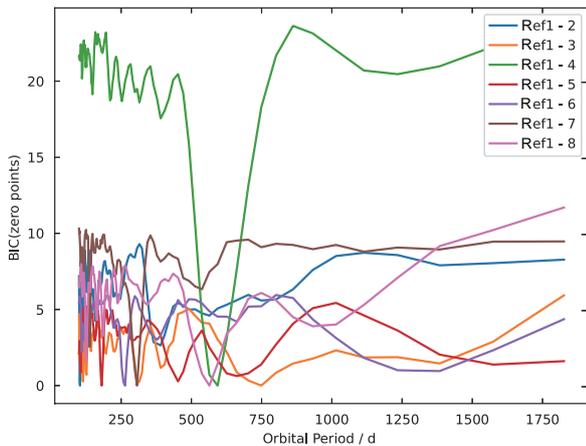


图 12 第一颗参考星与其他参考星之间时序天体测量数据的BIC周期谱

Fig. 12 BIC periodogram of astrometric data between the first reference star and others

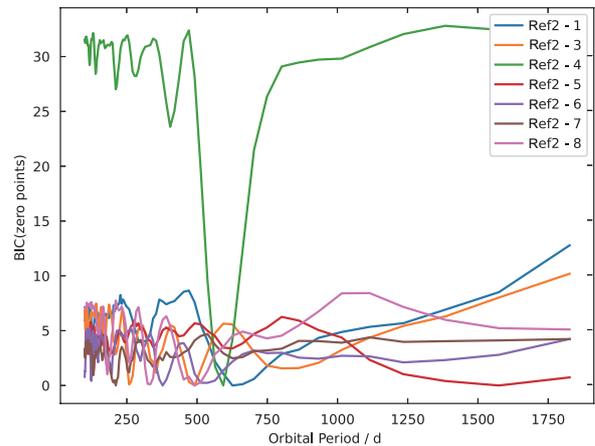


图 13 第二颗参考星与其他参考星之间时序天体测量数据的BIC周期谱

Fig. 13 BIC periodogram of astrometric data between the second reference star and others

5 总结与展望

在本文中, 我们首先基于CHES任务给出了模拟观测方法, 包括噪声来源、曝光时间与观测次数的确定及仿真数据的生成方法, 建立了数据处理和轨道拟合程序以获得天体测量数据中行星或其他天体的质量与三维轨道参数, 并可结合其他系外行星探测方法进行轨道反演. 随后对Alpha Centauri A、模拟太阳系系统、51 Peg与Cyg X-1双星系统4个目标, 使用Lomb-Scargle与BIC周期谱两种方法分析行星轨道周期信号, 进而采用MCMC算法对4个系统进行轨道反演, 解算结果与给定的初始参数吻合, 并发现即使在系统中存在多颗行星的情况下, CHES仍可探测到宜居带内的类地行星, 验证了数据处理方法和行星参数反演程序的可行性. 最后, 本文研究了在参考星周围存在巨行星的情况下, 如何排除其对数据处理的影响. 另外在将来的工作中, 我们还将对行星轨道的拟合方法做进一步改进, 在行星开普勒解的基础上发展N体积分动力学数值轨道解, 讨论不同轨道构型对行星探测能力的影响, 这将有助于我们更好地了解系外多行星系统. 相比于其他探测方法, 恒星活动性对天体测量精度影响更小, 但对距离更近的恒星,

如Alpha Centauri A & B, 其产生的干扰可能与仪器噪声相当^[61]. 对CHES目标星的活动性研究表明, 超过90%目标星由于恒星活动性产生的天体测量误差均值在 $0.3 \mu\text{as}$ 以内, 对探测类地行星影响很小^[62]. 为了更好地制定空间任务观测方案, 在后续研究中我们将深入探究恒星活动性的影响.

参考文献

- [1] Mayor M, Queloz D. *Nature*, 1995, 378: 355
- [2] Mayor M, Pepe F, Queloz D, et al. *Msngr*, 2003, 114: 20
- [3] Baranne A, Queloz D, Mayor M, et al. *A&AS*, 1996, 119: 373
- [4] Pepe F, Cristiani S, Rebolo R, et al. *Msngr*, 2013, 153: 6
- [5] Borucki, W J, Koch, D, Basri, G, et al. *Science*, 2010, 327: 977
- [6] Howell S B, Sobeck C, Haas M, et al. *PASP*, 2014, 126: 398
- [7] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. *JATIS*, 2015, 1: 014003
- [8] Cumming A. *MNRAS*, 2004, 354: 1165
- [9] Kipping D M. *MNRAS*, 2013, 434: L51
- [10] Ford E B. *PASP*, 2004, 116: 1083
- [11] Meunier N, Lagrange A M, Borgniet S, et al. *A&A*, 2015, 583: A118
- [12] Haywood R D, Collier C A, Unruh Y C, et al. *MNRAS*, 2016, 457: 3637
- [13] Meunier N, Lagrange A M, Borgniet S. *A&A*, 2020, 644: A77
- [14] The Theia Collaboration, Boehm C, Krone-Martins A, et al. *arXiv*, 2017, [arXiv:1707.01348](https://arxiv.org/abs/1707.01348)
- [15] Reylé C, Jardine K, Fouqué P, et al. *arXiv*, 2023, [arXiv:2302.02810](https://arxiv.org/abs/2302.02810)
- [16] Perryman M, Hartman J, Bakos G á, et al. *ApJ*, 2014, 797: 14
- [17] Shao M, Livermore T R, Wolff D M, et al. *BAAS*, 1995, 27: 1384
- [18] Catanzarite J, Law N, Shao M. *Optical and Infrared Interferometry*. Bellingham: SPIE Conf, 2008, 7013: 70132K
- [19] Malbet F, Léger A, Shao M, et al. *ExA*, 2012, 34: 385
- [20] Crouzier A, Malbet F, Henault F, et al. *A&A*, 2016, 595: A108
- [21] Nemati B, Shao M, Gonzalez G, et al. *SPIE*, 2020, 11443: 114430O
- [22] Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. *RAA*, 2022, 22: 072003
- [23] Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. *ChJSS*, 2024, 44: 193
- [24] Perryman M. *The Exoplanet Handbook*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2018: 81
- [25] Kopparapu R K, Ramirez R M, SchottelKotte J, et al. *ApJ*, 2014, 787: L29
- [26] Creevey O L, Sordo R, Pailler F, et al. *arXiv*, 2022, [arXiv:2206.05864](https://arxiv.org/abs/2206.05864)
- [27] Brown R A. *ApJ*, 2009, 699: 711
- [28] Thiele T N. *AN*, 1883, 104: 245
- [29] Horne J H, Baliunas S L. *ApJ*, 1986, 302: 757
- [30] Zechmeister M, Kürster M. *A&A*, 2009, 496: 577
- [31] Mortier A, Faria J P, Correia C M. *A&A*, 2015, 573: A101
- [32] Nelson B E, Ford E B, Buchner J, et al. *AJ*, 2020, 159: 73
- [33] Hara N C, Unger N, Delisle J B, et al. *A&A*, 2022, 663: A14
- [34] Rosenthal L J, Fulton B J, Hirsch L A, et al. *ApJS*, 2021, 255: 8
- [35] Jin S, Ding X, Wang S, et al. *MNRAS*, 2022, 509: 4608
- [36] Gregory P. *Bayesian Logical Data Analysis for the Physical Sciences: A Comparative Approach with Mathematical Support*. New York: Cambridge University Press, 2005: 312
- [37] 黄平辉, 季江徽. *天文学报*, 2016, 57: 568
- [38] Huang P H, Ji J H. *ChA&A*, 2017, 41: 399
- [39] 许伟维, 廖新浩, 周永宏, 等. *天文学报*, 2016, 57: 422
- [40] Xu W W, Liao X H, Zhou Y H, et al. *ChA&A*, 2017, 41: 381
- [41] Muterspaugh M W, Lane B F, Kulkarni S R, et al. *AJ*, 2010, 140: 1657
- [42] Fulton B J, Petigura E A, Blunt S, et al. *PASP*, 2018, 130: 044504
- [43] Dumusque X, Pepe F, Lovis C, et al. *Nature*, 2012, 491: 207
- [44] Xiao G Y, Liu Y J, Teng H Y, et al. *RAA*, 2023, 23: 055022
- [45] Feng F B, Anglada-Escudé G, Tuomi M, et al. *MNRAS*, 2019, 490: 5002
- [46] Martins J H C, Santos N C, Figueira P, et al. *A&A*, 2015, 576: A134
- [47] Birkby J L, de Kok R J, Brogi M, et al. *yCat*, 2017, 153: 138
- [48] Timmes F X, Woosley S E, Weaver T A. *ApJ*, 1996, 457: 834
- [49] Farr W M, Sravan N, Cantrell A, et al. *ApJ*, 2011, 741: 103
- [50] El-Badry K, Rix H W, Quataert E, et al. *MNRAS*, 2023, 518: 1057
- [51] El-Badry K, Rix H W, Cendes Y, et al. *MNRAS*, 2023, 521: 4323
- [52] Yamaguchi M S, Kawanaka N, Bulik T, et al. *ApJ*, 2018, 861: 21
- [53] Fabian A C, Rees M J, Stella L, et al. *MNRAS*, 1989, 238: 729

- [54] Miller-Jones J C A, Bahramian A, Orosz J A, et al. *Science*, 2021, 371: 1046
- [55] Fulton B J, Rosenthal L J, Hirsch L A, et al. *ApJS*, 2021, 255: 14
- [56] Collaboration G. *yCat*, 2018, 154: 345
- [57] van Belle G T, von Braun K. *ApJ*, 2009, 694: 1085
- [58] Keenan P C, McNeil R C. *ApJS*, 1989, 71: 245
- [59] 刘书瑀, 刘佳成, 朱紫. *天文学报*, 2017, 58: 56
- [60] Liu S Y, Liu J C, Zhu Z. *ChA&A*, 2018, 42: 594
- [61] Meunier N, Lagrange A M. *A&A*, 2022, 659: A104
- [62] Bao C H, Ji J H, Tan D J, et al. *AJ*, 2024, 167: 286

Observation Simulation and Orbital Retrieval of the CHES Satellite

BAO Chun-hui^{1,2,3} JI Jiang-hui^{1,2,3} TAN Dong-jie^{1,2,3} JIN Sheng^{1,2,3} HUANG Xiu-min^{1,2,3}

WANG Su^{1,2,3} CHEN Guo^{1,2,3} DONG Yao^{1,2,3} LIU Jia-cheng⁴

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(3 Key Laboratory for the Planetary Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(4 School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023)

ABSTRACT So far, most of the exoplanets have been discussed with the radial velocity and transient methods, in comparison with these detection techniques, the astrometric method has unique advantages in the determination of planetary orbital parameters and masses. Closeby Habitable Exoplanet Survey (CHES) will search for terrestrial planets in the habitable zone around 100 sun-like stars in the solar system's neighbors (about 10 pc from the sun) using the micro-arcsecond space astrometry method, and further carry out a comprehensive census of nearby planetary systems to obtain the true mass of planets and three-dimensional orbital parameters to establish a complete database of the nearby planetary systems. Based on the observation mode and scientific objectives of the CHES satellite, this work conducted the simulated observations on Alpha Centauri A, a simulated solar system, 51 Peg, and the black hole Cyg X-1, and generated astrometric simulation data, using two periodic spectra of Lomb-Scargle and BIC (Bayesian information criteria). The signal of the planetary orbit period is analyzed, and the orbit inversion of the planetary system is carried out with the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) algorithm. In addition, this work further discusses the influence of the planets around the reference stars on the detection of habitable planets, and the BIC periodic spectrum can be used to identify the reference stars that may have planets around them.

Key words astrometry; planets and satellites: detection, terrestrial planets; methods: numerical