

基于光学指向望远镜的快速天线指向测量研究^{*}

袁野^{1,2,3} 王娜^{1,2†} 刘志勇^{1,2‡}

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(2 射电天文与技术全国重点实验室 北京 100101)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 轨道不平对大口径射电望远镜指向有着重要的影响, 轨道相关的指向测量需要较高的空间采样密度。由于射电指向校准源数量较少, 须借助地球自转形成足够空间密度的覆盖, 导致其测量速度受到限制。光学指向望远镜(Optical Pointing Telescope, OPT)可在不依赖地球自转情况下获取高空间密度的数据, 但测点数量大的特性仍制约着测量速度。提出了在OPT观测中采用OTF(On-The-Fly)模式的方法, 可在天线持续大角速度运动中进行测量, 避免在预定测点处建立稳定跟踪的耗时。针对OPT和射电望远镜的轴角编码器在大角速度下性能下降问题, 开发了基于YOLO(You Only Look Once)的拖尾星点提取方法, 并建立了编码器误差模型, 最终实现了天线在1°/s转速下的指向测量。此测量数据可以较好地反映2''幅度的轨道不平效应。

关键词 望远镜: 射电望远镜, 技术: 指向测量, 方法: 数据分析

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

射电望远镜对指向性能的要求通常为波束 FWHM (Full Width at Half Maxima)的1/10。随着射电望远镜口径的增加和频率的升高, 波束宽度减小, 对指向的要求也相应地升高。如GBT (Green Bank Telescope)实现了4''的全天指向和1.2''的局部参考指向性能^[1-2]; ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)要求2''的全天指向性能和0.6''的局部参考指向性能^[3]。在建的奇台射电望远镜(Qitai radio telescope, QTT)预计在1.3 cm波段有5''的指向性能, 3 mm波段有1.5''的指向性能^[4]。在此精度需求下, 指向改正除了要考虑传统上的编码器误差、方位俯仰(Azimuth

和Elevation, 简称Az和El)轴误差等因素外, 还需要考虑轨道误差、结构在重力及环境影响下的变形等多种因素^[5-6]。近年来一些研究专注于射电望远镜局部变形对指向的影响, 如轨道不平^[7-9]、座架变形^[10-11]、俯仰体变形及副面位移等^[6,12]。

轨道不平因素的研究中, 通常需要关注多种空间尺度上的指向效应^[13-14], 因此需要较高空间密度的测量数据; 同时也意味着完成整个轨道测量所需的测点数量较大。研究中通常采用倾斜仪类设备或轨道高程测量方法获得轨道不平数据^[9,15-17]。这些数据空间密度较高, 且获取速度较快, 但需要模型转换后才可在指向修正中使用。因此仍需要相应的天文指向测量数据, 对上述模型进行验证

2025-01-02收到原稿, 2025-03-06收到修改稿

* 国家重点研发计划(2021YFC2203501)资助

† na.wang@xao.ac.cn

‡ liuzhy@xao.ac.cn

或限制其参数。考虑到射电望远镜指向特性可能会受到环境时变因素影响，较短的测量时间有利于排除这些因素的干扰^[8,10,18]。但测点空间密度高和总数量大这两种特性，对天文指向测量都有着较大的挑战，令测量难以较快地完成。

射电望远镜指向测量所用的标准源空间密度有限，通常利用地球自转效应，对单个源不断重复测量得到高空间密度的数据。地球自转的典型速度为 $15^{\circ}/\text{h}$ ，意味着此类方法速度无法超过这个极限。如Gawronski等人使用锥形扫描对单个源进行了持续指向测量，耗时约8 h，覆盖了 75° 的方位角范围，数据密度约0.5点/ $^{\circ}$ ^[13]；后续的测量中使用锥形扫描和单脉冲方式对标准源进行了持续指向测量，得到了约1点/ $^{\circ}$ 的数据^[15]。Lew利用了Torun 32 m射电望远镜的多次射电指向测量数据进行了轨道指向效应的研究，其中高空间密度数据仍来自于地球自转效应^[19]。Poppi等人在Medicina 32 m天线的轨道研究中使用了光学指向望远镜(Optical Pointing Telescope, OPT)；其观测耗时约9 h，覆盖了约 140° 的方位角范围，采样密度约为15点/ $^{\circ}$ ^[20]。虽然OPT有着测量速度快、可用目标源多的特点^[3]，但此次测量中仍然使用了单目标跟踪方式，因此并没有突破地球自转速度的限制。

当OPT视场较大时，利用其大量的可观测目标，观测方向可不必局限于标准源附近，即存在任意方向测量能力。DATE5 (5 m Dome A Terahertz Explorer)缩比天线、天马13 m以及NSRT (Nanshan radio telescope) 26 m的OPT指向测量研究中，验证了这种任意方向测量能力^[21-25]。任意方向测量能力可使高密度指向测量不依赖地球自转，但测点数量大的问题仍然存在。而射电望远镜在这些测点间移动耗时较大，仍难以实现快速测量。如NSRT 26 m接近目标时减速耗时大约为10 s^[25]，70 m口径的DSS-43 (Deep Space Station 43)天线在目标附近建立稳定的跟踪耗时约为20 s^[26]，64 m口径的SRT (Sardinia radio telescope)切换扫描路径时耗时约30 s^[16]。在面对大量待测点时，依次完成对这些测点的跟踪，可能仍需数小时。

鉴于大型射电望远镜建立稳定跟踪耗时较长，OTF (On-The-Fly)观测方法在许多观测场景中得到了应用^[26-27]。其主要特征是在射电望远镜运动的同时记录数据，以避免建立稳定跟踪过程的耗时，在待测点数量较大时可显著节省观测时间。结合OTF及OPT的特征，本文提出了一种快速获得大量高空间密度指向数据的方法。

2 测量方法

将OPT与待测射电望远镜刚性连接，安装位置示意图如图1所示。图1左图中矩形框标记了OPT在天线上的位置，右图为安装位置局部细节图。因为轨道不平问题仅与方位角有关，图1中的安装位置可以实现测量目标，且较便于操作。启动OPT以固定间隔持续拍摄图像，并记录各帧图像曝光开始的精确时刻。同时利用天线控制单元(Antenna Control Unit, ACU)驱动射电望远镜，以较快的速度完成方位角 360° 旋转，并记录各时刻的方位角编码器数值。



图 1 OPT安装位置示意图

Fig. 1 The installation position of the OPT

2.1 高角速度星点提取

本方法最主要的特点是使用了OTF的观测方式，星点预计会出现一定程度的拉长变形。对此类形状星点的有效提取则成为本方法的关键。以典型的 $1^{\circ}/\text{s}$ 的角速度、0.1 s的曝光时长为例，星点预计会拖尾成 $200'' - 300''$ 长度的“棒状”物体。光学天文常用的星点提取软件，如SEP (SExtractor)¹，

¹<https://sep.readthedocs.io/en/v1.0.x/index.html>

通常针对圆形或椭圆形目标设计, 对于“棒状”目标效果较差。我们基于深度学习框架和YOLO (You Only Look Once)²方法, 开发了一套专用于此观测的长条状星点探测代码。

由于探测原理基于卷积神经网络, 增加目标的特征预计将有利于探测。因此观测中在相邻两帧曝光之间加入了时间间隔, 并将两帧图像叠加, 使每个星形成了特征显著的“双棒状”结构。同时考虑到YOLO方法对大量小物体的探测性能不佳, 数据处理中将每张原始图像分割成12幅“子图”, 以提升目标物体相对全图的尺寸。

从本次观测的图像中任选了2帧, 分割共得到24幅“子图”, 进行人工标注后作为训练数据。图2显示了其中一张“子图”及其人工标注后形成的矩形框。其中图2 (a)中可以看到相邻两帧叠加形成的“双棒状”目标。通过人工识别目标并用矩形边框覆盖目标, 如图2 (b)所示。矩形边框的位置和尺寸数据, 与原图像一起组合成训练数据。由于图像背景干净, 只有一类探测目标且特征显著, 对YOLO模型而言难度较低, 只需一定的迁移学习至此特定分类。使用PaddleX框架中迁移学习默认的训练方法, 如其文档中所示³其中模型选择为“PPYOLO”, 预训练模型选择为“COCO”, 其余参数为默认值。训练在NVIDIA RTX 2070 GPU上进行, 耗时约13 min。

对于OPT拍摄的图像, 相邻两帧叠加形成“双棒状”星点, 并按照标注阶段相同的方法分割成12个“子图”。使用训练好的模型进行推理, 得到“双棒状”物体的边框坐标, 实现目标探测。根据探测所得边框坐标剪裁, 得到每个“双棒状”物体的局部图像, 然后使用一标准卷积核与每个局部图像做相关运算, 获取其重心位置, 实现重心定位。图3显示了某幅“子图”剪裁得到的“双棒状”目标的局部图像以及后续卷积运算的标准卷积核。其中标准卷积核由所有的局部图平均所得, 如图3 (b)所示, 反映了“双棒状”星点的典型形状。单个“棒状”形状拖尾长度约为10个像素。相关运算的结果

给出了两个“棒状”结构的中心位置, 其时刻对应着两次曝光时间的中点位置, 可以由两次曝光的快门开启的时间戳计算得到。对于一帧图像, 得到所有的“双棒状”目标重心坐标后, 进行星图识别、坐标拟合等后续处理, 得到光轴的指向数据, 详情可参考文献[25]。

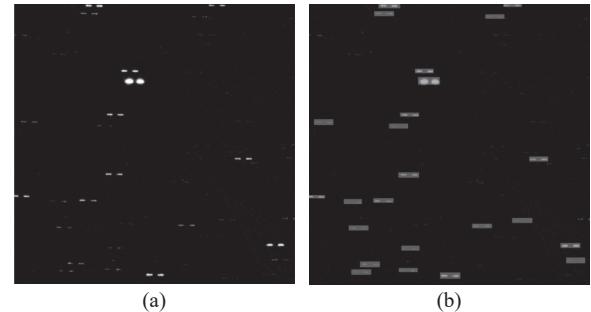


图2 相邻两帧图像叠加形成的“双棒状”星点示意图(a), 对其人工标注形成的矩形框(b)。

Fig. 2 Image of the “bar-pair” formed by superimposing adjacent frames (a), and its manually labeled bounding boxes (b).

图4显示了SEP和本文方法对同一图像的提取效果。SEP的结果存在一定的虚假信号和漏检, 如部分可以较容易人工识别的“棒状”被漏检; 而本文方法的结果则较为稳健。在后续处理中发现, SEP方法平均每图可解出51个星点, 本文方法平均每图133个。

2.2 指向数据处理

方位和俯仰方向的指向偏差可表达为:

$$\begin{aligned} ex &= x_{\text{opt}} - x, \\ ey &= y_{\text{opt}} - y, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 x_{opt} 和 y_{opt} 为OPT所测得的地平坐标(方位角, 俯仰角), x 为射电望远镜方位轴角编码器数值。由于OPT安装在方位座架上, 其俯仰角的理论值保持不变, y 值应为某常数, 此处可取所有 y_{opt} 数据的平均值。ex和ey为指向偏差, 其中即包含轨道不平对应的指向偏差, 但也同时包含其他指向误差因素, 如方位轴倾斜、编码器误差等。

²<https://github.com/ultralytics>

³https://github.com/PaddlePaddle/PaddleX/blob/release/2.1/docs/quick_start_GUI.md

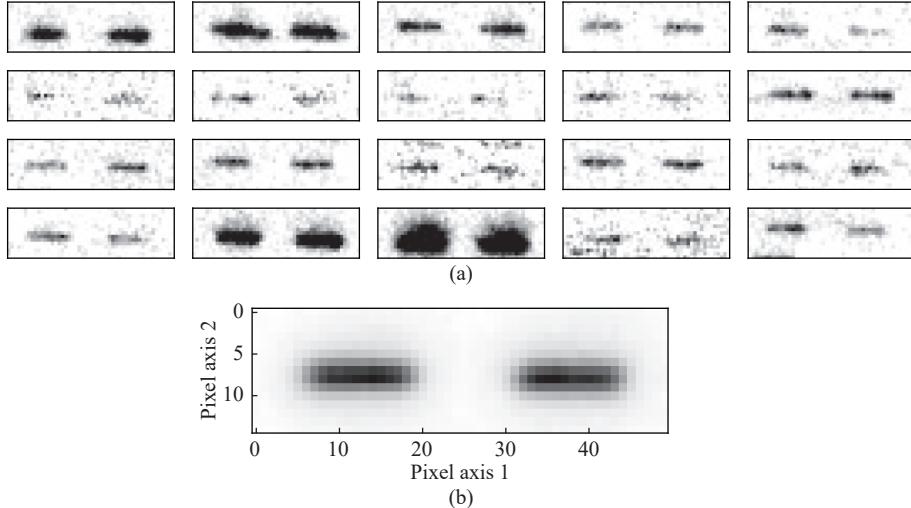


图 3 (a)通过边框剪裁得到的“双棒状”物体图; (b)相关运算所使用的卷积核.

Fig. 3 An example set of the sub-images cropped by bounding boxes (a), and the correlation kernel (b).

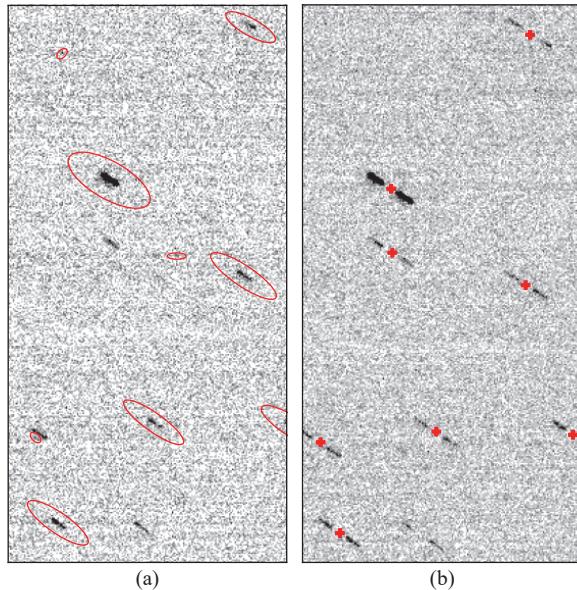


图 4 使用SEP (a)和本文方法(b)对同一拖尾图像的提取效果对比

Fig. 4 Comparison on the extraction of trailed star objects between SEP (a) and the method adopted in this work (b)

对于射电望远镜,一个常用的指向模型如下(2)式所示:

$$\begin{aligned} ex = & P_1 - P_2 \cos \phi \tan y + P_3 \tan y - P_4 \sec y + \\ & P_5 \sin x \tan y - P_6 \cos x \tan y + P_{12} x + P_{13} \cos x + \\ & P_{14} \sin x + P_{17} \cos(2x) + P_{18} \sin(2x), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ey = & P_5 \cos x + P_6 \sin x + P_7 + P_8 \cos y + P_9 y + \\ & P_{10} \cos y + P_{11} \sin y + P_{15} \cos(2x) + \\ & P_{16} \sin(2x) + P_{19} \cos(8y) + P_{20} \sin(8y), \quad (2) \end{aligned}$$

其中 P_1 为方位编码器零点误差, P_2 为方位轴变形误差, ϕ 为方位轴与水平面夹角, P_3 为俯仰轴倾斜, P_4 为电轴横向偏移, P_5 、 P_6 为方位轴倾斜, P_7 为俯仰编码器零点误差及电轴纵向偏移, P_8 为重力弹性变形. P_9 、 P_{10} 、 P_{11} 、 P_{15} 、 P_{16} 为俯仰编码器误差, P_{12} 、 P_{13} 、 P_{14} 、 P_{17} 、 P_{18} 为方位编码器误差. P_{19} 、 P_{20} 为高阶重力弹性变形. 由于此模型不包含轨道不平效应, 则可使用此指向模型对 ex 和 ey 进行预处理, 扣除已知因素, 从残差中得到轨道不平的实测结果.

3 观测

3.1 设备

观测采用了NSRT 26 m射电望远镜, 此望远镜为卡塞格林式, 地平式座架; 装备有L、S/X、C、K和Q波段接收机; 设计指向性能优于 $10''$. 天线方位轴最大转速 $1^\circ/s$, 俯仰 $0.5^\circ/s$ ^[28]. ACU可以提供20 Hz采样率的时间和方位俯仰角编码器测量信息.

本次使用的OPT硬件参数如表1所示. 此设备有着较大的视场, 且极限星等优于7 (v波段), 可以保证在射电望远镜旋转过程中一直有足够的星点

用于测量. OPT的数据处理流程由星点提取、畸变改正、星点识别、投影拟合、坐标转换组等步骤组成; 最终输出一组地平坐标(方位角, 俯仰角).

表 1 光学指向望远镜参数
Table 1 Optical pointing telescope parameters

Focal length	F-number	Field of view	Pixel size	Pix scale	Number of pixels
50 mm	0.95	12°×7°	5.9 μm	23"/pixel	1920×1200

3.2 观测过程

实际测量中, 考虑到ACU的工作方式和卷绕保护的逻辑, 将360°的转动角度等分为3段, 以位置命令的方式执行. 天线起始方位角为60°, 3段的方位角命令分别为300°、180°和60°. 图5显示了整个观测过程中方位角与时间的关系. 其纵坐标为方位编码器角度, 横坐标为相对于开始时刻的时间. 整个过程耗时约420 s. 观测现场手动实现3段命令角的输入, 因此两段之间会有不同程度的静止时间段. 在每段内, 天线绝大多数时间以最大速度(约1°/s)转动; 在接近命令角度时, 速度逐渐降低为0.

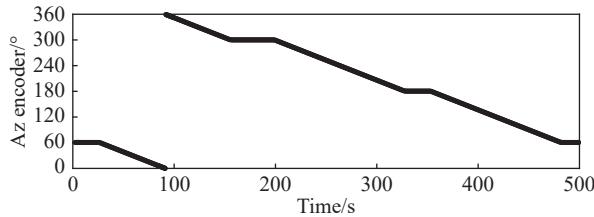


图 5 OTF 观测中编码器记录的运动轨迹

Fig. 5 The movement recorded by the encoder in the OTF observation

OPT的单次曝光时间为0.1 s, 帧率5 FPS, 即两帧之间有0.1 s的空闲时间未曝光. 每拍摄20帧之后, 将数据进行打包并发送至存储服务器. 打包和发送期间拍摄暂停, 发送完成之后恢复. 最终420 s时长的观测中获得43个打包后的文件, 共860帧图像.

4 数据处理

4.1 编码器数据处理

ACU提供了以20 Hz频率记录的方位编码器

在静止状态的观测中, 以10 Hz速率测量时, 测量精度可优于1''. 关于此OPT设备更多信息可参考文献[25].

数据, 即公式(1)中的变量 x , 其随时间的变化如图5所示. 经过局部放大后, 可以发现存在规律性波动, 如图6所示. 图6 (a)显示了一段以1°/s速度的运动, 其纵轴为编码器数据扣除了一匀速运动后的残差, 横轴为数据序列. 可以发现波动幅度峰值(A)约100'', 且形状较为规律. 截取不同转速区域的数据, 其波动幅度与转动速度的关系如图6 (b)所示, 其纵轴为波动幅度, 横轴为转速. 测量数据近似符合线性关系:

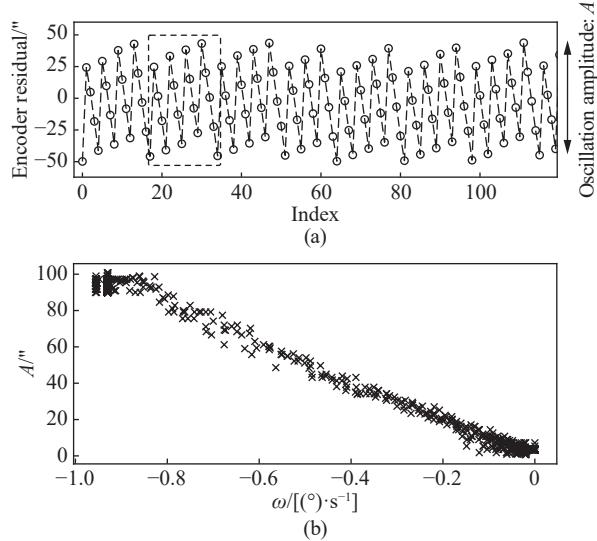


图 6 编码器波动误差(a)及其与转速的关系(b)

Fig. 6 The encoder “oscillation” errors (a), and the relation with speed (b)

$$A \approx k\omega, \quad (3)$$

其中 A 为波动幅度峰值, 单位为角秒; ω 为方位轴转速, 单位为度每秒; k 为斜率. 根据图6 (b)数据可知, k 的绝对值约为100.

此射电望远镜正常业务为跟踪天体,典型的转速约为 $15^\circ/\text{h}$;据公式(3)可得相应波动幅度约为 $0.42''$ 。此幅度远低于此射电望远镜的指向需求,对正常观测完全没影响,也导致了此效应此前从未被发现。但本次OTF观测由于采用了高达 $1^\circ/\text{s}$ 的转速,远超其正常跟踪转速范围,因此现有ACU无法保证此状态下的编码器输出精度。

此波动有着非常稳定的规律,如图6 (a)中虚线框所示。我们怀疑其更可能是某种虚假信号,而非天线真实的抖动,因此尝试建立一个结合测量和数据通信的模型,来模拟这个波动。图7显示了此模型的原理和产生的模拟数据。模型原理如图7 (a)所示,具体包含如下假设:

(1)假设编码器硬件以一个稳定的时钟周期 P_e 测量角度,并储存在缓存中。图(a)中方格表示每个测量值存在的时间段。

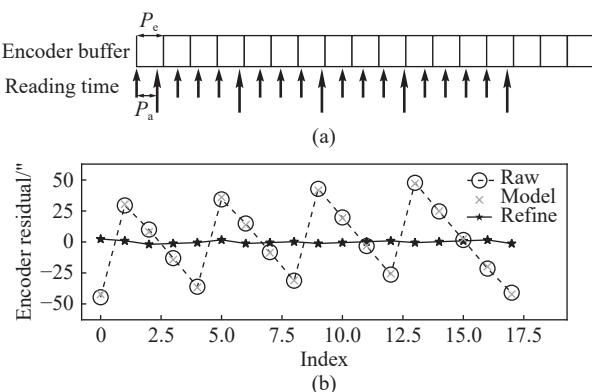


图 7 编码器误差模型(a)及基于此模型修正效果(b)

Fig. 7 A model to explain the encoder error (a), and its correction result (b)

(2)当编码器收到ACU读取数据的请求时,立刻发送当前缓存里的数值。图(a)中以向上的箭头表示ACU的每个读取动作。

(3)假设ACU的读取动作以 P_a 为周期,由于 P_a 和 P_e 不保证完全一致,若干个周期之后会出现两次读取位于同一个 P_e 周期内的情况,以较长的箭头表示。

(4)相对于其他正常读取的位置,较长箭头处会产生一个跃变现象。

基于上述模型,令编码器匀速转动,通过设置适当的 P_e 和 P_a 的关系,即可得到类似图6 (a)中的波动图形。图7 (b)显示了一个周期中模型的预测结果与ACU数据的对比,其中Raw数据即为图6 (a)中虚线框内的数据,Model数据为基于上述模型生成的数据,Refine数据为前两者的差异,即经过模型改正后的编码器数据。Raw或Model数据的4个峰值点,即为跃变现象发生点,可与图7 (a)前4个较长箭头对应。根据此模型可知,跃变幅度约等于一个 P_e 时长下转动的角度,即正比于转动速度;此正比关系也符合公式(3)所示的规律。通过精细化拟合转动速度、采样时间等参数,模型生成的曲线与ACU实测数据吻合良好。

我们也在ACU的原码中寻找了可能造成 P_a 和 P_e 周期不匹配的原因,发现其获取编码器角度值的机制如图8所示。

一个独立的线程在不断循环执行编码器角度值获取任务,包括请求硬件编码器的数据,并将其写入一全局变量“POS”中,然后等待25 ms,如图8中虚线框所示。此线程不断循环上述过程。

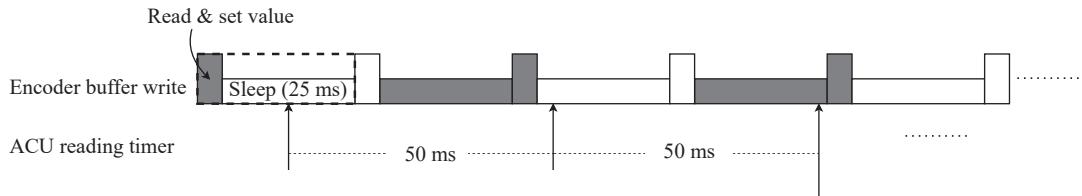


图 8 ACU 代码运行原理

Fig. 8 The running flow of ACU code

ACU其他业务代码由一定时器触发,定时器周期为50 ms。其中包含从全局变量“POS”中获得

编码器角度的操作。

图中灰/白色块表示“POS”变量值不发生变化

的时段, 即前文模型中假设的 P_e 跨度. 若 $2 \times P_e$ 与 P_a 对齐良好, 则 ACU 读取动作均应位于白色块中. 由于请求硬件数据和写入“POS”变量存在一定耗时, 整个 P_e 周期约为 28 ms, 导致 $2 \times P_e$ 不能与 P_a 严格对齐. 使得若干周期后, ACU 读取动作出现在意外的 P_e 周期中, 如图中较长的箭头所示. 使用实测数据的跃变点分布特性进一步约束 P_e 的长度, 结果约为 28.36 ms. 跃变处的幅度按一个 P_e 周期内转动角度估计, 公式(3)的斜率 k 值约为 102.1, 与基于实测数据估测的 100 较为接近.

综上, ACU 采集到的编码器数据中较大的波动, 大概率是由于缓存和读取周期差异造成的. 通过上文建立的模型, 可以较好地修正此波动. 故对 ACU 采集的所有数据利用此模型进行修正后, 作为公式(1)中 x 值, 参与指向偏差计算.

4.2 OPT 数据处理

将所有的 860 帧图像, 相邻两帧一组叠加得到 430 张图, 其中有 378 张处于 $1^\circ/\text{s}$ 转速的转动状态, 形成了预期的“双棒状”星点. 对此 378 张图使用第 2.1 节的提取算法进行星点提取, 得到了星点重心坐标. 并进行了后续的畸变改正、星图识别、投影拟合、坐标转换等步骤^[25], 得到了指向数据 $(x_{\text{opt}}, y_{\text{opt}})$. 共有 358 张图成功地获得了指向数据, 成功率约为 94%, 数据密度约 1 点/ $^\circ$.

5 结果

根据公式(1), 利用改正过的 ACU 数据作为 x , 得到的 ex、ey 与方位角(Az) 的关系如图 9 所示, 其中十字符号为 ex 值, 圆圈符号为 ey 值. 图中肉眼可见的最大的波动来自于方位轴倾斜效应, 使用指向模型公式(2), 去除 ex、ey 数据中的方位轴倾斜及编码器误差等因素后, 残差如图 10 中散点所示, 其中预计包含轨道不平、大气抖动、天线运动振动等效应. ex 和 ey 的残差 RMS (root mean square) 分别为 $4.8''$ 和 $3.3''$. 此幅度显著低于 NSRT 26 m 射电望远镜正常观测的指向需求, 不会对此射电望远镜科学观测造成影响, 但可以从中提取轨道不平效应的信息.

对图 10 中散点做滑动滤波后, 可得图中黑色

实线. Wen 等^[17] 曾对 NSRT 26 m 的轨道不平度进行了测量, 并利用轨道-座架相互作用模型预测了其对指向的影响; 如图 10 中黑色虚线所示, 在方位方向效应的峰峰值约 $\pm 6''$, 俯仰方向约 $\pm 2''$. 对比可以发现, 本文测量数据与轨道数据的预测曲线在方位方向上相关性较差, 其差异可能来自于座架的扭曲效应. 将座架扭曲效应纳入考虑后, 本文的实测数据给出的轨道效应在图 10 (a) 中表现为黑色细虚线, 与模型预测曲线吻合良好. 轨道扭曲效应的处理方法详见文献^[25]. 在俯仰方向上不存在额外的扭曲效应, 平滑后的实测曲线与模型预测值吻合良好.

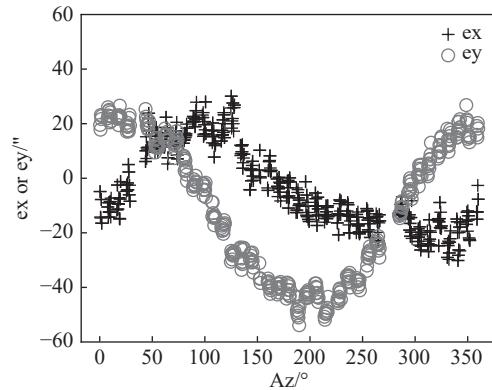


图 9 ex 和 ey 的测量结果

Fig. 9 Measurement result of ex and ey

ex 残差 RMS 略大于 ey 方向, 两者之间的差异可能包含残余编码器误差、大气闪烁、转动稳定性等因素, 这些因素的总体贡献可估计为 $\sqrt{4.8^2 - 3.3^2} \approx 3.5''$. 可见残余编码器误差不超过 $3.5''$, 相对于原始数据中约 $100''$ 幅度的跳变, 已经得到了大幅改正. 考虑到本次实验 ACU 提供的编码器数据位数极限为 0.001° , 可认为此编码器模型已经起到良好的改正作用.

6 讨论

本次测量耗时约 7 min, 基本等同于天线转动 360° 所用的时间, 获得的数据密度约 1 点/ $^\circ$. 图 10 中的残差 RMS 可对本次测量精度做一个估计, 在方位和俯仰两个方向上分别为 $4.8''$ 和 $3.3''$. 但由于数

据密度较高, 可以进行一定的平滑操作来提升探测精度. 如图10 (b)中俯仰方向的对比结果, 显示其成功探测到了2"幅度的轨道不平效应. 若进行多轮测量平均, 则可在不降低数据空间密度的情况下降低RMS. 假设以随机误差的特性估测, 使用 N 倍的测量时间RMS可降低为 $N^{-0.5}$ 倍. 本研究为

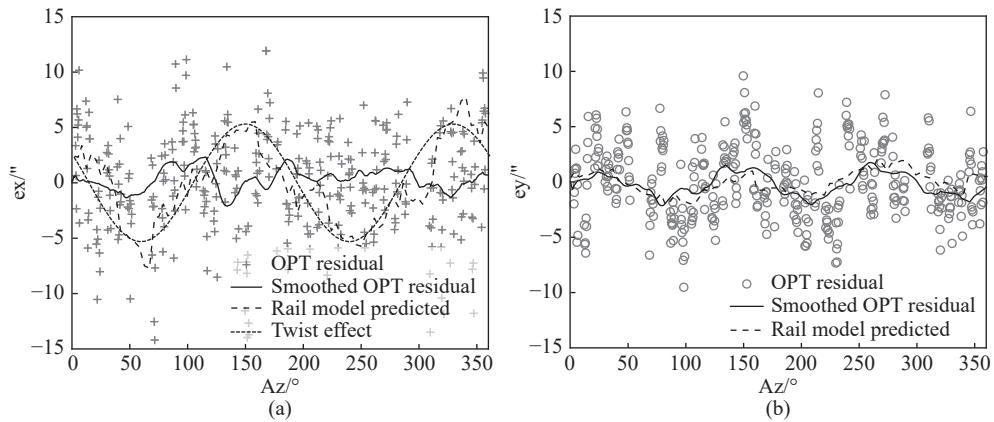


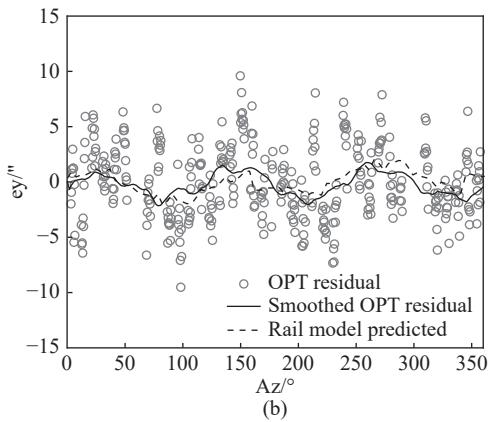
图 10 OPT 测量结果与轨道模型预测值对比. (a) 方位方向, (b) 仰俯方向.

Fig. 10 The OPT observed data and the rail model predicted value. (a) ex direction, (b) ey direction.

本方法最大的优势是速度上限较高, 尽管精度可能有一定的劣势. 在此之前, 此类测量耗时均为数小时, 且其测量原理意味着速度难以提升, 无法适用于对测量速度有一定需求的场景. 限制速度提升的因素主要来自两方面: (a) 地球自转速度, 将测量速度限制为15°/h左右; (b) 射电望远镜建立稳定跟踪的耗时, 预计每个测点不小于10 s. 利用射电目标的测量方法, 由于目标分布的稀疏性和探测器阵列规模, 只能采用对单个源跟踪的方式, 故受限于地球自转速度. 如Gawronski等人在NASA深空网天线上进行的射电测量^[13,15], 以及Poppi等人采用跟踪方式的OPT测量^[20], 测量速度都被限制在15°/h左右, 此时建立跟踪的耗时可以忽略. 天马13 m以及NSRT 26 m实验中虽然可利用全向OPT摆脱地球自转速度限制^[23-25], 但仍受建立跟踪的耗时限制, 在进行大量测点测量时耗时仍难以小于1 h. 本方法在全向OPT设备基础上, 进一步采取了OTF方式观测, 摆脱了上述两个因素的限制, 实现了更高的测量速度.

本研究目前未进行深度优化, 其仍有进一步

轨道不平效应研究提供了一个精度、密度和速度都较高的天文测量方法. 测量误差可以接受的情况下, 如本次NSRT 26 m上的应用, 测量速度可达1°/s. 当需要更低的测量误差时, 如指向精度需求2"左右的百米级射电望远镜, 可通过增加测量时间降低测量误差.



降低测量误差的可能性. OPT和编码器的测量误差共同决定了指向偏差数据的误差. OPT测量方面, 本实验在1°/s角速度下测量的RMS明显高于此设备静止时的RMS (< 1"). 这种现象也常见于星敏感器类设备的高动态工况, 前人对此也有一定的研究, 其主要原因是星光能量分散后导致了信噪比降低, 进而增大了测量误差. 在此情况下可通过算法或增稳机构重新聚集星光、采用动态权重、减少曝光时长等方法提升精度, 未来研究中将尝试这些方法. 对于多数影响指向的时变因素, 0.5–1 h的测量时间仍可以接受, 因此也可以结合降低角速度的方式获得更高精度的测量结果.

ACU提供的编码器数据误差是另一个误差来源. 本研究中的编码器误差主体正比于角速度, 呈现有规律的跳变. 通过模型假设及对ACU代码的解析, 建立缓存-读取结构的模型修正了此误差, 在现有编码器数据位数下起到了良好的效果, 剩余残差不高于3.5". 如果条件允许, 也可考虑在ACU代码中缩短编码器数据缓存段时间长度(P_e), 以减小原始数据波动幅度. 后续研究中预计将优

化编码器数据记录位数及 P_e 长度, 以增加高精度角度测量的潜力, 尝试进一步研究残差中剩余的编码器误差特性。

多数射电望远镜被设计于地球自转速度下跟踪目标, 在高角速度下(如 $1^\circ/\text{s}$)的控制和测量性能都没有得到验证, 故暂无法预测高角速度下编码器数据误差会呈何种形式。若其他望远镜编码器在高转速下误差特性与本研究中的相同, 则可考虑用相同的方法进行修正。若除此之外仍存在其他起因的编码器误差, 则需要对其具体分析和修正。此外俯仰方向的测量结果不受编码器数据影响, 故即使新的编码器误差形式未能及时修正, 预计俯仰方向也可以获得不低于本实验精度的数据。

本文OTF模式的OPT指向测量, 也可应用于天线的其他位置。如在俯仰结构上安装之后, 令俯仰轴做快速转动, 可研究整个俯仰角范围内重力变形等效应; 或方位、俯仰两轴组合转动, 快速完成全天各向测量, 用于建立全天指向模型。

7 结论

本文提出了一个快速获得高空间密度指向数据的方法。此方法基于OPT, 使用OTF观测模式, 在7 min时间内获得了方位角 360° 范围内的指向数据, 共358个数据点。数据在方位和俯仰方向上的 RMS 分别为 $4.8''$ 和 $3.3''$ 。从数据中提取到的轨道不平效应, 与轨道高程差测量的结果吻合良好。

开发的基于YOLO方法对拖尾星点进行探测和定位的代码, 与天文通用星点提取代码相比, 此方法在提取数量和完整性上都有显著提高, 且易于操作。此外在高角速度下的编码器数据里发现了显著异常波动。通过建立测量和通讯时序的模型, 成功地模拟出了此波动效果, 并基于此模型对编码器数据进行了修正。但这也预示在超出正常观测角速度时, 天线系统能提供的精度可能无法保证。

参考文献

- [1] Prestage R M, Constantikes K T, Hunter T R, et al. IEEEP, 2009, 97: 1382
- [2] White E, Ghigo F D, Prestage R M, et al. A&A, 2022, 659: A113
- [3] Mangum J G, Baars J, Greve A, et al. PASP, 2006, 118: 1257
- [4] Wang N, Xu Q, Ma J, et al. SCPMA, 2023, 66: 289512
- [5] Gawronski W. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15: 276
- [6] Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. SSPMA, 2017, 47: 129504
- [7] Constantikes K T. Precision Telescope Control System, 2008, 53: 17
- [8] Fu L, Wang J Q, Jiang Y B, et al. ExA, 2019, 48: 49
- [9] Xue S, Ma K T, Wang C S, et al. International Journal of Antennas and Propagation, 2020, 2020: 2706309
- [10] Wei S X, Kong D Q, Wang Q M. RAA, 2021, 21: 137
- [11] Attoli A, Stochino F, Buffa F, et al. Structures, 2022, 39: 901
- [12] Lösl M, Haas R, Eschelbach C, et al. JGeod, 2019, 93: 2069
- [13] Gawronski W, Baher F, Quintero O. IAPM, 2000, 42: 28
- [14] Li N, Li P, Wu J, et al. RAA, 2017, 17: 23
- [15] Gawronski W, Baher F, Gama E. Optomechanical Technologies for Astronomy. Bellingham: SPIE, 2006, 6273: 627316
- [16] Pisanu T, Buffa F, Poppi S, et al. Ground-based and Airborne Telescopes V. Bellingham: SPIE, 2014, 9145: 91454R
- [17] Wen H X, Xu Q, Wang N. AR&T, 2019, 16: 158
- [18] Fu L, Ling Q B, Geng X G, et al. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II. Bellingham: SPIE, 2016, 9912: 99124J
- [19] Lew B. ExA, 2018, 45: 81
- [20] Poppi S, Pernechele C, Pisanu T, et al. Ground-based and Airborne Telescopes III. Bellingham: SPIE, 2010, 7733: 773316
- [21] 应晓科, 娄铮, 刘伟, 等. 天文学报, 2021, 62: 132
- [22] Ying X K, Lou Z, Liu W, et al. ChA&A, 2022, 46: 282
- [23] 孙正雄, 毛银盾, 王锦清, 等. 天文学报, 2023, 64: 3
- [24] Sun Z X, Mao Y D, Wang J Q, et al. ChA&A, 2023, 47: 928
- [25] Yuan Y, Liu Z Y, Wang N. AdAst, 2024, 2024: 1538293
- [26] Rochblatt D, Seidel B. DSN Microwave Antenna Holography, Telecommunications and Data Acquisition Progress Report, Washington D C: National Aeronautics and Space Administration, 1984, 46-47: 27
- [27] Mangum J G, Emerson D T, Greisen E W. A&A, 2007, 474: 679
- [28] Xu Q, Li L, Wang N. Ground-based and Airborne Telescopes VII. Bellingham: SPIE, 2018, 10700: 107002W

Research on Rapid Antenna Pointing Measurement Based on Optical Pointing Telescopes

YUAN Ye^{1,2,3} WANG Na^{1,2} LIU Zhi-yong^{1,2}

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

(2 State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Beijing 100101)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT The track unevenness has a significant impact on the pointing performance of large radio telescopes. The track unevenness related pointing measurements require a high spatial sampling density, necessitating a large number of measurement points. Given the limited number of radio pointing calibration sources, sufficient spatial sampling density must be achieved by Earth's rotation, which limits the measurement speed. OPTs (Optical Pointing Telescopes) can obtain high spatial density data independently of Earth's rotation, but the large number of measurement points still constraints the measurement speed. This paper proposed the adoption of OTF (On-The-Fly) mode in OPT observations to avoid the time-consuming process of establishing stable tracking at predetermined measurement points. To address the performance degradation of the antenna's encoder and the OPT at a high angular speed, a "bar-shaped" star extraction method based on the YOLO (You Only Look Once) approach was developed, and an encoder error model was established. Ultimately, pointing measurements at an angular speed of 1°/s were achieved. This measurement effectively detected the track unevenness effects with amplitudes of 2 arcseconds.

Key words telescopes: radio telescope, techniques: pointing measurement, methods: data analysis