星敏感器技术在射电望远镜指向测量中的应用

袁野^{1,2*}, 刘志勇^{1,2,3}

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院射电天文重点研究室, 南京 210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100094

*联系人, E-mail: yuanyc@xao.ac.cn

收稿日期: 2019-02-01; 接受日期: 2019-04-23; 网络出版日期: 2019-07-31

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)和中国科学院“西部之光”项目(编号: XBQN-A-1)资助

摘要 大型射电望远镜指向精度要求高, 但自身跨度大易变形, 其指向性能会受多种因素影响. 且大型射电望远镜惯性较大, 传统的波束扫描方式进行指向测量耗时较多, 难以快速地进行. 通过辅助设备精确地测量中心体的方向可以对上述测量和改正问题进行分解研究, 可降低问题的复杂度且提高指向测量的效率. 星敏感器技术可以通过对星图的拍摄和处理, 以几赫兹的频率获得亚角秒精度的指向参数, 能较好地满足中心体方向测量的要求. 本文阐述了星敏感器辅助测量射电望远镜指向的原理, 介绍了数个射电望远镜使用星敏感器技术开展的观测和测试情况, 并对在大型射电望远镜上搭建低成本星敏感器系统进行了一定的探讨.

关键词 星敏感器, 导星, 射电望远镜, 指向

PACS: 95.55.Jz, 95.10.Jk, 84.40.Ba, 95.55.Br

1 大型射电望远镜的指向问题

大口径射电望远镜在高频观测时, 波束宽度非常小, 对指向精度要求很高. 例如, QTT(QiTai Radio Telescope)最高频段的指向精度要求为 $2.5''$. 然而大型天线有较大的结构跨度和重量, 更容易在各个部位产生变形而影响其指向精度. 因此对于大型射电望远镜, 很多因素都会对指向精度造成显著影响, 如天线结构误差、副面支撑变形、主面背架变形、天线座架变形、编码器误差、伺服误差和重力变形等^[1].

传统的天线指向测量一般采用十字扫描方法对射

电源进行扫描, 获取最大增益点的方向, 进而获得电轴指向偏差. 此测量方案测得的是上述各种因素的综合叠加效果. 通过合理地指向模型的设计, 可以使用大量的测量数据一次性拟合出多种误差系数. 为了使测量数据覆盖到所有类型的偏差特性, 此类测量的数据点需要在方位俯仰空间内均匀分布, 需要大量的时间以及大量的可观测源. 而对于大型天线, 其惯性大, 加减速难度大, 扫描观测耗时远大于小天线; 在高频观测时, 可用的射电源也相对较少. 因此使用大型天线进行全天的电扫描是非常不经济的.

若以天线中心体作为一中间参考系, 可将指向问

引用格式: 袁野, 刘志勇. 星敏感器技术在射电望远镜指向测量中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099510

Yuan Y, Liu Z Y. The application of star trackers in radio telescope pointing measurement (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 099510, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0034](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0034)

题分解为两部分: 天线电轴相对于中心体的指向和中心体相对于地面坐标系的指向^[2]. 目前的天线理论认为, 影响电轴相对于中心体坐标系指向变化的因素, 主要来自于副面支撑变形、背架变形等微波光学相关的因素, 最终需要通过电扫描才能得到实测结果. 而中心体相对于地面的指向误差, 则综合了座架结构误差及变形、轨道误差、编码器误差和伺服误差等, 其本质上是一个不涉及微波光学的纯几何方向误差问题, 可以使用其他方法进行测量.

目前的星敏感器, 能在角秒量级的精度上测量中心体在天球坐标系里的指向. 其每秒可以进行数次测量, 且不需要望远镜做扫描动作, 非常适合上述指向分解之后的第二部分指向误差测量工作. 星敏感器工作可用的源众多, 典型的测量视场内可以观测到数十颗星, 几乎可以对天球上任何方向进行测量.

若能通过星敏感器技术实现上述两部分分离, 则两部分的偏差不再耦合在一起, 降低了误差模型的复杂度和描述误差. 对于第一部分电轴相对于中心体坐标系的偏差, 仍无法避免地要使用耗时较多的电扫描方式测量. 但目前的理论认为这部分偏差基本和方位角无关, 在分离研究的情况下, 可以不考虑对其在方位空间采样, 降低了所需的数据量, 节省了时间开支. 对于第二部分的中心体相对于地面坐标系的误差, 需要在方位俯仰角的二维空间里均匀采样, 需要的采样点较多. 但在星敏感器较快的测量速度下, 其测量速度也会有显著的提升.

2 星敏感器的基本原理

现代的星敏感器通过光学镜头和CCD/CMOS图像传感器, 在视场范围内拍摄得到星图. 对星图中的星点进行提取和精确位置测量后, 得到各星点在传感器上的高精度位置(图1). 若在全天识别工作模式(Lost In Space)下, 星点位置数据经过星图识别算法之后, 可以得到各个观测星点在源表里对应的源, 从而可以匹配坐标, 解算出中心光轴的指向; 若在跟踪模式下, 则通过连续监视星点位置漂移, 计算出系统指向变化^[3].

星点定位算法从传感器生成的二维灰度图片中, 识别出星的图像, 并得到星精确的位置坐标. 星点定位的算法主要有质心类方法和PSF(Point Spread Function)类方法等^[4,5]. 其中质心类方法运算量较小, 适合

图1 星敏感器的工作原理

Figure 1 The working principle of the star tracker.

星载等环境下运算能力和功率有限的情况, 精度相对于某些PSF类较差. PSF类方法有着较高的精度, 但往往计算量较大. 在较高信噪比的情况下, 所有算法的单星点精度都可以达到好于0.1 pixel的水平. 当视场里有多颗可以用于定位的星时, 使用多星的位置对系统光轴进行综合定位, 误差会进一步降低.

星图识别算法读入上一步提取到的各星点的坐标, 与预存的源表中的星进行比对, 确定出观测星与源表星的对应关系. 星图识别主要有三角类算法和格栅类算法等^[6]. 三角类算法对观测星的数目要求较低, 但星表比较大, 解算缓慢; 格栅类算法匹配速度较快, 但要求较多的观测星. 从源表中获取到各拍摄星的天球坐标之后, 就可以计算出光轴方向的天球坐标, 再根据几何安装关系, 可以得到被测物体的方向信息.

表1是几个典型的星敏感器的参数^[4,7]. 其视场多在 5° – 15° , 两方向的定位精度可优于 $1''$, 数据更新频率在2–10 Hz. 以ST5000为例, 其参数已经可以满足我们的测量需求.

3 星敏感器在射电望远镜上的应用

3.1 ALMA原型天线实验

ALMA(Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array)阵列望远镜的12 m天线在900 GHz频率上工作时波束大小约 $6''$, 与QTT在115 GHz频率上工作时的波束大小类似. 其设计指向参数为全天 $2.0''$, 局部参考条件下 $0.6''$ ^[8]. 其原型天线测试时搭载了一台Optical Pointing Telescope (OPT), 此望远镜用了一个102 mm口径、920 mm焦距的折射物镜, 配合2倍巴洛镜构成

表 1 几个典型的星敏感器参数

Table 1 Parameters of some typical star trackers

星敏感器	精度 (")	更新率 (Hz)	口径 (mm)	视场 (°)	重量 (kg)
HAST	0.2	10	110	8.8	20.4
AST-301	0.18	2	88	5	7.1
ST5000	0.5	10	52.6	5.4×7.4	5
ASTRO15	1	4	50	13.3	6.2

了一等效焦距1840 mm光学镜头, 最终在相机传感器处的空间采样间隔为 $1.12''/\text{pixel}$, 采样率可达10 Hz. 镜筒和安装支架使用了因瓦合金以减少热变形的影响. 整个光学望远镜系统安装在天线背架上, 指向天线观测的方向, 通过主面上的开孔拍摄星图. 其安装位置和外观如图2所示.

他们使用此系统对天线的换源过程、跟踪过程、近距离switch观测过程以及全天指向模型进行了测量研究; 并在数月的时间内对天线的指向特性进行了监视. OPT的全天数据与电扫描的数据对比后发现, 正常情况下, OPT的指向模型中只需要修改轴偏置项和重力变形项之后, 就可以较好地满足电轴指向修正的需求^[9].

测试天线位于在VLA(The Karl G. Jansky Very Large Array)的台址, 而当地的光学波段Seeing水平大概在 $1.5''$, 这使得OPT的测量数据中有较大幅的高频抖动, 难以在实验中获得伺服系统的中高速误差. 整个测试期间温差有 30°C , 期间未发现温度对指向数据的影响, 这说明低热膨胀系数的镜筒和支架材料发挥了预期的作用, 但同时发现温度变化会引起成像系统离焦^[9].

3.2 INAF光学指向实验

INAF(National Institute For Astrophysics)为了验证拟在SRT(Sardinia Radio Telescope)望远镜上使用的光学望远镜指向技术, 基于180 mm口径、1800 mm焦距的Maksutov折反射望远镜制作了一个星敏感器, 并安装在Medicina 32 m VLBI天线上进行了测试, 具体参数见表2. 此星敏感器安装方式与ALMA类似, 同样安

图 2 (网络版彩图)ALMA天线的光学指向望远镜^{1)[8]}Figure 2 (Color online) The optical pointing telescope of the ALMA antenna^{1)[8]}.

装在背架上, 通过主面开孔向前观测. 他们用此星敏感器对单个源进行了跟踪试验, 短时间跟踪的指向偏差RMS可达 $0.05''$. 长时间跟踪的数据中, 俯仰方向的偏差与倾斜仪的数据比较吻合. 此外他们还在这套设备上安装了红外滤光片, 进行了白天观测的测试²⁾.

3.3 SOFIA望远镜

SOFIA(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)是一台口径2.5 m, 可以覆盖从紫外到远红外波段的望远镜. 安装在改装的波音747SP飞机上, 在高空飞行时观测, 以避免低海拔稠密的大气对红外信号的吸收. 由于其安装基础是飞机, 编码器无法获得相对于地面坐标系的指向数据, 只能得到其相对于飞行坐标系的数据. 通过飞机仪表得到的飞行坐标系相对于地面坐标系的指向关系精度较低, 使用此数据将望远镜指向转换到地面坐标系无法满足精度要求. 因此必须要有星敏感器建立望远镜与天球坐标系的关系.

SOFIA望远镜使用了视场从小到大的三个星敏感器系统: FPI, FFI和WFI, 其主要参数见表2. 由于SOFIA的主镜光学系统本身性能可以覆盖到光学和红外波段, 其FPI则直接使用了主镜的光路, 获得了极高的

1) Jeff M. The ALMA Optical Pointing Systems: Design Considerations, Prototype Description, and Production Model Suggestions. NRAO, 2005

2) Poppi S, Pernechele C, Morsiani M, et al. An optical telescope to achieve a tracking and pointing model for radio telescopes, INAF-IRA

表 2 几个射电及亚毫米波望远镜上星敏感器参数**Table 2** Parameters of star trackers on some radio or submillimeter telescopes

望远镜及星敏感器	口径 (mm)	视场	像素间隔 (")
ALMA OPT	102	12'×9'	1.12
Medicina ST	180	19.5'	2.3
Sofia WFI	68	6°	21
Sofia FFI	254	67'	4.1
Sofia FPI	2500	9'	0.55
BLAST ISC/ OSC	100	2°×2.5°	7

灵敏度和分辨率. WFI和FFI装在主镜框架上, 提供较大视场的星图, 以保证其指向的全天识别能力. 望远镜跟踪系统同时使用三个星敏感器的综合数据, 对指向进行补偿. 望远镜的结构和几个星敏感器的安装位置如图3所示.

几年前这三个星敏感器进行了升级, WFI和FFI的低温离焦问题得到了改善; FPI的新相机刷新率提高到 400 Hz. 得益于大型主镜提供的高灵敏度, FPI可以在此高频下持续对星点进行测量, 得到高频的指向偏差数据, 可以监视飞机的震动对指向的影响.

4 大型射电望远镜用星敏感器的选择

4.1 视场需求

星敏感器的可见星数, 通常用以下方法估计. 在恒星服从泊松分布的假设下, 一定视场里探测到的星数通常可以如下公式描述^[11]:

$$N_{\text{FOV}} = 6.57e^{1.08M_v} \times \frac{1 - \cos\left(\frac{A}{2}\right)}{2}, \quad (1)$$

其中 $6.57e^{1.08M_v}$ 为全天范围内, 亮度在给定星等 M_v 以上的星的数量; $1 - \cos\left(\frac{A}{2}\right)/2$ 为 A 度视场覆盖的立体角占全天的比例. 假如相同的口径和感光芯片条件下, 会有相同的极限星等, 则可探测星数只与视场大小有关.

较大的视场会获得更多的恒星数, 有利于通过多星定位减小指向输出误差; 同时也导致角采样间隔增加,

图 3 (网络版彩图)SOFIA望远镜上各星敏感器的布局^[10]**Figure 3** (Color online) The layout of star trackers on the SOFIA telescope ^[10].

降低单星定位精度. 综合这两种效应, 通过计算可以发现, 在所有星参与定位的情况下, 理论上最终定位精度与视场关系不大.

相同口径下, 大视场的光学设计比较复杂, 焦比小于1.2时较难保证成像质量^[12], 故选择大视场的情况下, 口径受到焦比的限制, 可能难以保证所需大小的口径. 大视场边缘的像差和畸变也会增加部分星点的定位误差, 难以达到理论的测量精度. 虽然存在上述难点, 但大视场系统焦距方向较短, 系统尺度可以比较紧凑; 且大视场的全天搜索运算量相对较小、难度较低、成功率高. 故在多数航天器上, 大视场方案被广泛的应用. 小视场系统通常焦距会比较长、支撑结构跨度较大、重量较大、有更大的机械结构方面变形的风险, 造成测量误差^[2]. 小视场系统焦比较大, 选用较大的口径对于光学设计难度较低. 故典型的小视场系统往往有着更大的口径, 获得更好的灵敏度. 此外, 为了应对白天观测时弥散天光的影响, 小视场系统是必须的, 以降低单个像素内天光的亮度.

4.2 射电望远镜的特性

相对于空间卫星以及ALMA等小型天线, 大型射电望远镜安装空间较大、载重能力强, 其观测室可以提供强大的计算分析能力, 可以考虑安装多组不同视场的星敏感器协同工作. 射电望远镜上的工作环境, 不会有空间星敏感器所面对的超低温、真空以及发射时的高过载和振动等, 而且安装位置可以人员到达进行调试和维护; 这对设备可靠性的要求降低了很多. 地基射电望远镜有着高精度的方位和俯仰轴的编码器

提供基础的指向数据, 其上安装的星敏感器不是唯一的姿态测量机构, 实时性和数据上报率需求相对较低, Lost In Space能力要求也较低.

射电望远镜低频波段观测时, 对其上的电子设备 RFI(Radio Frequency Interference)阈值有着非常严格的限制, 这可能是目前空间星敏感器不具备的. 此外, 地面望远镜受到光学Seeing的影响, 目前的星敏感器工作模式难以在地面达到空间环境时的精度.

4.3 商业相机的试验

BLAST, EXEB等多个星敏感器都使用了商业相机的镜头, 但是后端配置为专用科学相机^[13]. 相比之下, 市面上的商业相机往往有着更高的像素, 与其镜头有着更好的匹配、较低的成本和采购难度; 但动态范围、灵敏度、软件开发接口方面有一定劣势. 我们使用尼康D850机身+24-70/2.8镜头的商用单反相机套装, 对星图进行了拍摄试验. 在66 mm焦距上使用最大光圈进行了拍摄测试, 曝光时间1/15 s. 此时折合口径约23.6 mm, 像素间隔约13.5". 对V波段6.198星等的HD40347星可以得到接近10的信噪比, 成像效果如图4所示.

未来我们计划使用135/2.0镜头(口径约67.5 mm)搭配此相机进行测量. 此组合视场约 $10.2^\circ \times 15.2^\circ$, 分辨率为6.6"/pixel; 预计对8等星拍摄得到10的信噪比, 视场内将有数百颗星可供测量使用. 参考ST5000星敏感器性能(像素间隔35", 在跟踪24个星的情况下可以达到0.5"的指向测量精度), 预计此套系统的光学性能可支持到角秒级定位精度. 但其机械稳定性、热稳定性及数据传输能力还需要进一步试验.

图4 (网络版彩图)尼康D850套机及其拍摄的HD40347数据

Figure 4 (Color online) The Nikon D850 camera and its observation data towards HD40347.

5 结论

大型射电望远镜指向精度要求高, 多种因素可以对其指向造成影响. 传统的电轴扫描方法对于惯性巨大的天线来说耗时过多, 且难以有针对性地分析解决各类误差因素的影响. 星敏感器可以通过拍摄星图, 以几赫兹的频率获得亚角秒精度的指向参数. 使用星敏感器对中心体指向进行精确测量可以将射电望远镜的整体指向问题分解为电轴方向和几何指向两个问题, 而这两个问题分别可以用更高效的方法测量.

Medicina 32 m, ALMA, SOFIA等射电及亚毫米波望远镜制作了自己的星敏感器并搭载到天线上进行了观测测试, 证明了此方案的可行性, 并积累了一定的经验. 我们在此基础上讨论了大型射电望远镜的独特性及其对星敏感器的要求, 并使用低成本的商用相机进行了简单的灵敏度测试及部分先导试验, 预计此设备可以在一定程度上满足测量需求.

参考文献

- Wang J Q, Yu L F, Zhao R B et al. High precision pointing error detection method for large radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 125–134 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 大型射电望远镜高精度指向偏差检测方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 125–134]
- Assaworrorit S, Padin S. An optical pointing telescope for radio astronomy. *Publ Astron Soc Pac*, 2012, 124: 242–246
- Liang B, Zhu H L, Zhang T, et al. Research status and development tendency of star tracker technique (in Chinese). *Chin Opt*, 2016, 9: 16–29 [梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势. 中国光学, 2016, 9: 16–29]
- Jia H. Research on Star Point Extraction and Star Map Recognition with High Precision Star Sensor (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 [贾辉. 高精度星敏感器星点提取与星图识别研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2010]
- Hao Y C, Jia R M, Ma X L. Star locating algorithm based on PSF correlation (in Chinese). *Aerospace Control Appl*, 2015, 41: 1–7 [郝云彩, 贾瑞

- 明, 马晓蕾. 基于PSF相关的星点定位算法. 空间控制技术与应用, 2015, 41: 1–7]
- 6 Li J C. Research on Star Map Recognition Algorithm Based on Star Sensor (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018 [李江操. 基于星敏感器的星图识别算法的研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2018]
- 7 Young E F, Mellon R, Percival J W, et al. Sub-arcsecond performance of the ST5000 star tracker on a balloon-borne platform. In: Proceeding of 2012 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2012. 3
- 8 Ukita N, Ikenoue B, Saito M. Optical seeing measurements with an optical telescope on a radio antenna. Publ Natl Astron Obs Japan, 2008, 11: 1
- 9 Mangum J G, Baars J, Greve A, et al. Evaluation of the ALMA prototype antennas. Publ Astron Soc Pacific, 2006, 118: 1257–1301
- 10 Wolf J, Sebastian C, Michael L, et al. Deutsches SOFIA Institut (DSI) at the SOFIA Science Center: Engineering and scientific contributions to the airborne observatory. Infrared Remote Sens Instrum XXIV, 2016, 9973: 99730J
- 11 Zhang H. Research on Key Technology of High Precision Double Field Star Sensor (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 [张华. 高精度双视场星敏感器关键技术研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2011]
- 12 Cao Y. Research on New Technology of Nano-Star Sensor (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2016 [曹阳. 纳型星敏感器新技术研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2016]
- 13 Xu Q, Zhao C H, Li X. Current situation and key technologies of daytime star sensor (in Chinese). Opt Tech, 2016, 42: 523–528 [徐卿, 赵春晖, 李晓. 白昼星敏感器的研究现状及关键技术. 光学技术, 2016, 42: 523–528]

The application of star trackers in radio telescope pointing measurement

YUAN Ye^{1,2*} & LIU ZhiYong^{1,2,3}

¹ Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011 China;

² Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

The large radio telescope reacquires rigorous pointing performance, and its pointing performance can be influenced by much more factors due to its large scale. The conventional pointing measurement method would be time-consuming because of the telescope's large inertia. An accurate direction measurement of the receiver cabin structure can transform the pointing measurement and correction problem into some less complex problems. The star tracker can provide pointing measurement data of sub-arcsecond precision at several Hz update rate, which satisfies the measurement needs well. We introduced the scheme to pointing the telescope with assistance of star trackers, and presented application examples of them on some radio telescopes. At last, we discussed some specific requirements of the star tracker used on large radio telescopes and the possibility of low-cost solutions with commercial cameras.

star tracker, optical pointing telescope, radio telescope, pointing

PACS: 95.55.Jz, 95.10.Jk, 84.40.Ba, 95.55.Br

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0034](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0034)