

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.02.02

程控自主天文台网络的发展

崔辰州¹, 李 建¹, 蔡 栩¹, 范玉峰², 王 锋³, 曹子皇¹,
苏丽颖⁴, 樊东卫¹, 乔翠兰⁵, 何勃亮¹, 李长华¹, 赵永恒¹,
谌 悦¹, 王传军², 辛玉新², 白金明², 季凯帆³

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011; 3. 昆明理工大学, 昆明 650500; 4. 北京工业大学, 北京 100021; 5. 华中师范大学, 武汉 430079)

摘要: 网络技术的不断发展和望远镜远程控制技术的成熟让无人值守的程控自主天文台成为可能。把多个独立运行的程控自主天文台通过网络连接起来协同工作, 就是程控自主天文台网络。程控自主天文台和概要式巡天在共同开启时域天文学并进而推动天文学跨越式发展的同时, 也给研究方式和技术应用带来全新的挑战。回顾程控自主天文台网络的发展轨迹, 总结实现的基本思路和逻辑结构, 介绍科学应用, 探讨随之而来的挑战, 尝试分析在天文学上的发展前景和国内的发展战略。

关 键 词: 程控自主天文台; 望远镜网络; 自主观测; 时域天文学

中图分类号: P111.43 **文献标识码:** A

1 引 言

望远镜设计制造、探测器、数据处理等技术的进步使得天文观测能力不断增强, 灵敏度越来越高。也因此, 天文观测对工作环境的要求越来越苛刻。同时, 随着文明程度的不断提高, 人类活动给自然环境带来了巨大的改变, 造成严重的光污染、空气污染、电磁污染。为了获得尽可能理想的观测结果, 天文学家必须避开这些污染进行观测, 把天文台站向偏远的地方甚至太空迁移。

现代天文学已经进入多波段和时域天文学时代, 成为一门数据密集型科学。多波段数据的融合、海量复杂数据的分析和挖掘成为新世纪天文学研究的主要方法。现代文明对环境的干预使得满足天文观测所需条件的地域不断萎缩, 造成观测设备和数据的严重分散。天文学研究对科技资源统一使用的需求与科技资源分散布局的现实形成了一对尖锐的矛盾。

收稿日期: 2012-12-28; 修回日期: 2013-03-07

资助项目: 国家自然科学基金委员会与中国科学院天文联合基金(U1231108); 科技部科技基础性工作专项(2012FY120500); 北京市科技新星计划(2007A085)

程控自主天文台 (Robotic Autonomous Observatory, 简称 RAO) 和程控自主天文台网络 (Robotic Autonomous Observatory Network, 简称 RAON) 是“科学驱动, 技术使能”的产物, 为这一矛盾的解决提供了可能的途径。

当前, 计算机作为一项核心的技术手段已经广泛应用于观测系统控制和数据处理的全过程。网络技术的不断发展和望远镜远程控制技术的成熟让无人值守的自动化天文观测成为可能。利用计算机完全取代人进行观测的想法导致了程控自主天文台的诞生。把多个独立运行的程控自主天文台通过网络连接从而协调地运行, 这就是程控自主天文台网络。

本文针对程控自主天文台网络这一新兴技术发展领域进行了回顾、总结和展望。本文内容结构安排如下: 首先简要回顾程控自主天文台的发展历史和几个发展阶段; 然后介绍当前世界上有代表性的 RAON 系统; 第 4 章介绍国内在 RAO 和 RAON 领域的研究情况; 第 5 章归纳出 RAON 的逻辑架构并做实例剖析; 第 6 章简要介绍 RAO 和 RAON 的应用领域; 接下来阐述 RAON 面临的技术挑战; 最后总结全文并对 RAON 的发展前景进行展望。

2 历史回顾

程控自主天文台是由一系列子系统相互协作构成的复杂系统, 以计算机为核心, 其发展与计算机工业的发展息息相关。在早期的建设中, 其软硬件由大量功能单一的子系统构成, 代价昂贵, 功能有限。自 20 世纪 80 年代起, 由于个人计算机的推出, 多个程控望远镜计划开始酝酿, 部分计划取得了成功, 自此人们开始试图标准化程控望远镜的各个系统。进入 21 世纪之后, 随着现代信息技术的突破性进步, 大量的望远镜都实现了信息化的改造。近年来, 人们逐渐认识到程控天文台开启了人类在非静态和暂现事件方面对宇宙进行观测的能力, 随即时域天文学成为天文学研究的一个新热点^[1,2]。同时, 人们意识到小口径望远镜大有用武之地, 它们所具有的大视场是一个非常重要的优势。小口径望远镜易于安装部署, 可以方便地安装在不同的地区并进而组成一个望远镜网络, 能极大地提高观测的空域和时域覆盖。

2009 年, 在西班牙召开的首届程控自主天文台国际研讨会^①上, 与会代表就程控自主天文台的重要历史发展阶段达成了如下共识:

第一阶段, 自动执行望远镜 (Automated Scheduled Telescope), 即一架可以执行预先编制好观测流程而无需远程观测者实时干涉 (例如不需要观测者手动调节赤道仪) 的望远镜。这一时代可追溯到 1968—1975 年间。1968 年, 威斯康辛大学的 Code 和他的助手们完成了最早的自动光电测光望远镜, 实现了用一台 PDP-8 通用型数字计算机控制一架 0.2 m 口径的望远镜来进行自动测光^[3]。

第二阶段, 远程操作望远镜 (Remotely Operated Telescope), 即一套按照观测者的要求执行远程观测的望远镜系统。这个阶段大约对应于 1975—1984 年。在 1976—1977 年间, 高加索山的 6 m 前苏联地平式大望远镜和美国怀俄明州红外天文台 2.3 m 望远镜成为第一批通过计算机控制的大型望远镜。1983 年 10 月 13 日夜晩, 美国亚利桑那州凤凰城, Boyd 和 Genet

^①<http://rts2.org/malaga/>

在 Boyd 的后院天文台完成了一台 0.25 m 口径的 Phoenix 望远镜。他们两个看着这架望远镜自动寻星, 为一个个的目标进行 UBV 测光, 最后回房间睡觉。从此, 世界上有了第一套可重复执行预定作业的望远镜系统^[4]。

第三阶段, 程控自主天文台 (Robotic Autonomous Observatory), 即一架能够执行各种远程观测, 并且能够在任务执行过程中没有任何人为协助的情况下自主适应各种变化的望远镜 (例如, 天气监测, 系统不能危及人类等)。1984 年, 拉帕尔玛天文台的卡尔斯伯格午环 (0.18 m 口径) 在哥本哈根大学和西班牙圣费尔南多皇家海军学院天文台 (Real Instituto y Observatorio de la Armada) 等科研机构的共同努力下实现了自动化, 成为最早的几个自主天文台之一^[5]。早期的程控自主天文台主要用来实现在晴夜中对一系列事先定义好的目标进行测光观测。自动光电测光望远镜 (APT) 服务就是其中代表性的例子^[6]。最早的一套 APT 放置在美国霍布金斯山上, 它知道何时日落, 能感知雨雪^[7]。英国的布拉德福德程控望远镜 (Bradford Robotic Telescope)^①于 1993 年开始通过网络运行, 接受任何用户提交的观测请求。这架望远镜可以看成是第一套完全用于教育目的的设备, 至今一直在成功地运行^[8]。1985 年前后, Trueblood 和 Genet 的《望远镜的微机控制 (Microcomputer Control of Telescopes)》一书出版, 标志着程控望远镜进入了一个新的发展时代。随后, 爱荷华州立大学 20 世纪 90 年代早期完成的自动望远镜设施 (Automated Telescope Facility, 简称 ATF) 成为对 RAO 深入探索的典型代表。ATF 随后被加以完善, 并于 1997 年更名为爱荷华程控天文台 (Iowa Robotic Observatory)^[9]。

2001 年至今, 程控自主天文台网络时代。20 世纪末到 21 世纪初, 一些科学家提出了多种全球自主望远镜网络的想法, 例如 eSTAR^[10]、RoboNet-II^[11]、异构望远镜网络 (HTN)^[12]等。尽管其中没有一个成为现实, 但这些想法为下一个阶段的研究带来了启迪。随着信息技术、智能控制技术、传感器网络等技术的进步和成熟, 近年来, 一批程控天文台建成^②, 同时还诞生了最早的一批全球网络, 比如 ROTSE-III^[13](部署在澳大利亚、纳米比亚、土耳其和美国的 4 架 0.45 m 望远镜)^③、BOOTES^[14]、TAROT^[15](两架 0.25 m 望远镜, 部署在法国和智利)、MASTER^[16,17]、ROBONET(部署在夏威夷、澳大利亚和卡纳瑞群岛的 3 架 2 m 望远镜)^④、MONET^⑤[18](部署在美国和南非的两架 1.2 m 望远镜)、HATSouth 等^[19]。计划中的还有更多, 比如 SOLARIS^[20](部署在澳大利亚、非洲和南美的至少 4 架 0.5 m 望远镜)、KMTNet^[21](部署在智利、南非和澳大利亚的 3 架 1.6 m 光学望远镜) 等。第 3 章将选择几套代表性的系统进行介绍。

第四阶段, 程控智能天文台 (Robotic Intelligent Observatory), 即一个由人工智能系统进行决策的程控天文台。这是下一步努力的方向。

^①<http://www.telescope.org/>

^②<http://www.astro.physik.uni-goettingen.de/hessman/MONET/links.html>

^③<http://rotse.net/information/world/>

^④<http://www.astro.ljmu.ac.uk/RoboNet/>

^⑤<http://monet.uni-goettingen.de/>

Castro-Tirado 对上述望远镜程控化的历史做了较为全面的回顾,有兴趣的读者可以进一步阅读参考文献 [22]。

3 典型系统扫描

3.1 HATNet 和 HATSouth

匈牙利自动望远镜 (HAT)^[23,24]由匈牙利的一个研究小组开发完成。最初的想法由波兰天文学家 Bohdan Paczyński 提出。从 2001 年 5 月开始在美国亚利桑那基特峰上的斯图尔特天文台 (Steward Observatory) 运行。HAT 每个节点由一台 Linux PC 操控。口径 65 mm 焦距 180 mm 的尼康长焦镜头配备 2048×2048 像素的 CCD 像机,视场 9×9 平方度。HAT 最初的科学目标是对北天的亮变星进行巡天观测,完成 ASAS(全天自动巡天)^[25]计划在北天的观测任务。ASAS 原设想通过部署在智利和夏威夷的自动望远镜对全天亮于 14 mag 的约 2×10^7 颗恒星进行测光监测。到 2003 年, HAT 的规模已由原来的 1 台设备扩展到 6 台,并组成一个观测网络,称为 HATNet^①,由哈佛史密松天体物理中心负责运行。HAT 的含义从最初的“Hungarian Automated Telescope”调整为“Hungarian-made Automated Telescope”。部署地点也从斯图尔特天文台迁移出来,史密松天体物理台 (SAO) 放置 4 套,夏威夷莫纳克亚天文台放置 2 套。其中在 SAO 还增加了一架高桥 BRC-250 望远镜,口径 25 cm,焦距 1.25 m,称为 TopHAT。

以 HATNet 为基础,由美国普林斯顿大学、德国马普天文研究所、澳大利亚国立大学共同打造了 HATSouth 系统。HATSouth 在南半球的 3 个地点(智利,纳米比亚和澳大利亚)部署了 6 套望远镜设备。每套设备包括 4 台口径 0.18 m,焦比 $f/2.8$ 的望远镜,安装在同一个赤道仪上。HATSouth 声称自己是世界上第一个全年 7×24 h 对整个南半天球进行监测的自动望远镜网络。

3.2 BOOTES

BOOTES(全称为 Burst Optical Observer and Transient Exploring System),中文名“全球 γ 暴与瞬变源观测系统”^②。该系统最早由西班牙安德鲁西亚天体物理研究所发起,现有的参加成员单位主要包括西班牙安德鲁西亚天体物理研究所、西班牙马拉加大学、欧洲空间天文中心 (ESAC)、捷克科学院天文研究所、新西兰奥克兰大学、中国科学院云南天文台等。BOOTES 的项目理念是使用相同的望远镜、相同的滤光片 (g, r, I, Z, Y)、相同的 CCD 相机,期望在一些关键的科学领域取得成果。该计划的主要科学目标包括伽玛射线暴 (GRB) 光学对应体的同步观测、微引力透镜研究、系外行星探测、宇宙起源光学闪的探测、高能目标的光学监测、著名天体的长期监测、空间科学计划的地面观测支持、程控自主天文台控制系统研究等。

^①<https://www.cfa.harvard.edu/gbakos/HAT/index.html>

^②<http://bootes.iaa.es/>

完整的 BOOTES 项目将在世界不同位置安放 6 台配置和性能尽量相同的光学全自动望远镜, 最终形成一个全球观测网, 使得任何时刻至少有一台望远镜处于黑夜中。目前 BOOTES 网络由 4 台 60 cm 光学望远镜和一台 60 cm 光学/红外望远镜组成。BOOTES-1 安装于西班牙韦尔瓦的 El Arenosillo, 从 1998 年开始工作; BOOTES-2 安装于西班牙马拉加的 Algarrobo-Costa, 从 2001 年开始工作; BOOTES-IR/T60 OSN 安装在西班牙巴洛尔的 Sierra Nevada, 2004 年光学系统开始工作, 2008 年近红外系统开始工作; BOOTES-3 安装于新西兰马尔堡布伦海姆, 2009 年 2 月开始工作; BOOTES-4 安装于云南天文台高美古观测站, 2012 年 3 月开始工作。未来的两架望远镜计划部署在墨西哥和南非。

3.3 MASTER 和 MASTER II

RAON 一种典型的应用是利用小口径孪生望远镜对一个暂现天象的两个不同波段或两个不同的偏振方向进行观测。俄罗斯的首台程控望远镜 MASTER 建造于 2002—2006 年间, 安装在莫斯科附近。其升级版 MASTER II 则是由两台口径 40 cm 的孪生望远镜组成, 安装在赤道仪的两端。目前 MASTER II 由位于俄罗斯境内的 4 个台站组成, 并计划在西班牙加那利群岛部署第 5 个台站。MASTER II 的科学目标包括: GRB 同步多色和偏振观测, 超新星搜寻, 系外行星观测, 海外天体、彗星、小行星探测, 孤立余辉观测, 微引力透镜观测。希望解决的基本问题涉及暗能量研究、GRB 起源研究、行星系统起源等。

3.4 Pi of the Sky

“Pi of the Sky”^[26,27]是一个全自主、程控探测器系统, 主要用来对 GRB 的光学闪光进行观测。光学闪可能与伽玛射线同时爆发甚至早于伽玛射线的爆发。GRB 光学余辉观测的通常途径是接收 GCN 网络广播的天文卫星报警信息, 然后以尽可能快的速度把望远镜指向目标来进行。这种方式不可避免地将带来时间上的延迟, 使得光学波段的观测滞后于伽玛射线波段的观测, 不可能在 GRB 爆发同时甚至之前观测到光学闪。“Pi of the Sky”在结构设计和运行模式上采用了与其他 GRB 随动观测设备不同的思路: 它持续不断地对大范围的天空进行监视。每晚“Pi of the Sky”可以对可见天区完成 2 遍扫描, 从而增大观测到 GRB 事件的几率。这样的设计和运行模式消除了从卫星广播到 GCN, 从 GCN 到地面设备, 地面设备决策处理等一系列时间延迟。

“Pi of the Sky”的第一套原型系统借用了 ASAS 的圆顶, 2004 年 6 月在智利的 Las Campanas 天文台 (LCO) 投入观测。在那里, 他们成功观测到了 GRB080319B 爆发前、爆发中、爆发后的全过程。2011 年 3 月这套原型系统从 LCO 天文台转移到了智利北部的 San Pedro de Atacama。2010 年 10 月在 BOOTES-1 的站点上, “Pi of the Sky”安装了一个新系统, 由 1 个赤道仪加载 4 套 CCD 相机组成, 有广角和深空两种模式运行。广角模式 4 台相机的视场相邻并排分布, 视场约 40×40 平方度; 深空模式时 4 台相机观测相同天区, 视场约 20×20 平方度。通常采用广角模式运行以增加捕获 GRB 事件的几率。

完整的“Pi of the Sky”系统由相距约 100 km 的两个站点组成。每个站点装备 16 台定制的 CCD 巡天相机, 分成 4 组安装在 4 架赤道仪上。光学系统采用 $f = 85 \text{ mm}$, $f/d = 1.2$ 的佳能镜头, 视场大约为 20×20 平方度。最后的系统将覆盖约 2 个立体弧度, 大致相当于 Swift 卫

星上 BAT 设备的视场。“Pi of the Sky”的基本战略是尽可能地持续追随 Swift 卫星的观测区域。如果没有合适的卫星观测视场可尾随时,系统将选择其他的区域。

相隔一定距离的双站点设计可以减少飞机、人造卫星等人造闪光以及流星等近地闪光对观测的影响。相距约 100 km 的两个站点指向相同的区域同时观测,利用三角视差原理,很容易把人造卫星等的近地闪光剔除掉。

“Pi of the Sky”的软件控制系统称为“PiMan”^[28],基于成熟的工业标准,包括 CORBA、嵌入式 Linux、Django AJAX、Nagios 等。这个软件系统控制数据采集流程和在线数据分析的所有方面。每个观测夜,程序脚本将依据 Swift 卫星的指向自动运行。

3.5 SONG 和 TAT

在全球范围内分布式部署以对特定目标进行 24 h 不间断观测,是 RAON 另一个典型的应用,例如 SONG 计划^①和 TAT 系统。SONG (Stellar Observations Network Group, 恒星振荡观测网络)^[29,30]计划在全球范围内建设 8 台 1 m 口径的望远镜来持续不断地进行观测,主要科学目标是通过恒星表面视向速度和亮度变化的精确测量来开展亮星星震学和系外行星探测等方面的研究。2011 年 SONG 首台原型系统安装于西班牙加那利群岛上的泰德峰天文台。两台“幸运成像 (Lucky Imaging)”相机安装在望远镜的内氏焦点上,高分辨率光谱仪安装在折轴焦点上。利用“幸运成像”技术来对微引力透镜事件进行测光观测,通过高分辨率光谱仪对类太阳恒星进行高精度的视向速度观测。中国参与了 SONG 计划,并形成了 SONG-China 子计划。关于 SONG-China 的情况将在下文介绍。

“台湾自动化望远镜网络系统 (TAT)”是一个用于测量恒星光度脉动,进而研究恒星结构和演化的 RAON 系统^[31]。TAT 由中国台湾清华大学牵头提出,使用 4 架 9 cm 马克苏托夫望远镜用于恒星脉动观测和特定天体的长期监测,分别安装在西班牙特纳利夫岛的 Teide 天文台、乌兹别克斯坦的 Maidanak 天文台、中国科学院云南天文台丽江高美古观测站、美国夏威夷的 Mauna Loa 天文台。到 2011 年底,前 3 架已经安装完毕。

3.6 FT 和 LCOGT

福克斯望远镜 (Faulkes Telescope, 简称 FT)^②来自英国威尔士的加地夫,是一个教育和研究计划。福克斯望远镜由 2 台口径 2 m 的望远镜组成,部署在美国夏威夷毛伊岛哈里阿卡拉国家公园和澳大利亚新南威尔士州的赛丁泉天文台,分别称为北福克斯望远镜 (FT North) 和南福克斯望远镜 (FT South),是世界上最大口径的教育专用望远镜。福克斯望远镜向英国所有学校以及其它教育团体免费开放,支持他们开展摄影和研究活动。FT 的控制系统采用 RCS (Robotic Control System)^[32],提供两种工作模式:实时模式和离线模式。实时模式主要提供给学校使用,以 30 min 为 1 个时间单元,用户可以对望远镜进行全面的控制。离线模式主要用于科学观测,提供“灵活 (flexible)”、“固定时间 (fixed-time)”和“监测 (monitor)”3 种观测方式以满足不同观测任务的需要,比如要观测特定时间的暂现事件将使用固定时间方式,对特定目标的固定频率观测就可以采用监测方式;每种观测模式下望远镜都采取机遇目标观

^①<http://song.phys.au.dk/>

^②<http://www.faulkes-telescope.com/>

测优先的策略。两架福克斯望远镜目前加入了 LCOGT 计划^①。

LCOGT(Las Cumbres Observatory Global Telescope) 是一个由私人基金资助的 RAON 项目^[33,34], 目标是在全球建立一个新型的程控望远镜网络开展科学研究和教育, 为时域天文学提供更多的观测能力。这个网络将由一系列口径 2 m、1 m 和 0.4 m 的程控望远镜以及同类型的终端仪器构成。望远镜观测资源统一调度, 而非独立运行。LCOGT 的总部位于美国加州的戈利塔。LCOGT 网络中的每个节点计划采用类似的滤光片系统, 除了福克斯望远镜提供的成像观测能力外, 还将提供中分辨率阶梯光栅光谱和低分辨率光谱观测。

4 国内 RAON 领域的研究

国内天文界已经注意到这个快速发展的领域, 正积极参与各种可能的国际合作并努力寻找自主发挥的空间。

2012 年 3 月, 全球 γ 暴与瞬变源观测系统第四号观测站 (BOOTES-4)^{②[35,36]} 在中国科学院云南天文台丽江高美古观测站落成, 标志着国内首个专业级程控自主天文台建成。这是 China-RAON 第一项里程碑式的成果。

China-RAON 即“中国程控自主天文台网络”是由中国虚拟天文台 (China-VO)^{③[37]} 发起的一项应用研究计划, 主要成员来自国家天文台、云南天文台和昆明理工大学。China-VO 团队凭借 10 多年的天文软件系统开发和数据管理经验, 着重从软件和技术层面上对 RAON 进行探索, 为 RAO 和 RAON 在中国的推广和应用提供技术支持。

BOOTES-4 的引进使得我国天文学家可以支配 BOOTES-4 望远镜 15% 的观测时间, BOOTES 全球 RAO 网络其余望远镜 5% 的观测时间, 平等分享 BOOTES 计划所获得的科学数据, 为 GRB 的同步观测、系外行星探测、微引力透镜探测等课题的开展提供观测平台。同样重要的是, BOOTES-4 先进的软硬件系统, 特别是它所采用的 RTS2 软件系统, 可为国内 RAO 技术的研究提供良好的学习参考, 为我国自主研制 RAO 系统提供借鉴, 促进国内天文台站、学校、科技馆中小型望远镜的自动化改造, 进而更好地发挥设备的科研和教育科普作用。

目前 China-RAON 已经开始了 RAON 技术的深入研究和应用。国家天文台正在基于 RTS2 进行二次开发以支持更多的硬件设备^[38]。LAMOST 借助 RTS2 来改进观测控制系统。云南天文台基于 RTS2 开展差分像运动大气视宁度监测仪 (DIMM) 的自动化研究。昆明理工大学面向天文选址需求开展自主观测与数据传输技术研究。

中国于 2009 年 6 月正式加入 SONG 项目, 并产生了 SONG-China 子项目^④。SONG-China

^①<http://lcogt.net>

^②<http://b4.gmg.org.cn/>

^③<http://www.china-vo.org>

^④<http://song.bao.ac.cn>

的主要建设和研究内容包括以下几个方面:

- (1) 建造一个标准的 SONG 节点, 即建造一个与 SONG 原型相同的节点。
- (2) 在中国西部地区运行一个 SONG 节点, 目前在德令哈和南山等地选址。
- (3) 建造一个定制的 SONG 节点。该节点去除高分辨率光谱仪, 保留用于微引力透镜观测的幸运成像能力, 并加入广角成像能力。该节点计划部署在国家天文台南美观测站。
- (4) 50BiN, 一种用于变源时域研究的低成本、多台址测光系统, 具有大视场多色测光的能力, 并具备同时获取两个波段高精度测光数据的能力。其主要的科学目标是恒星的时域问题研究, 将开展星震学、双星、恒星活动、系外行星搜寻等天体物理前沿课题研究。50BiN 中国节点望远镜于 2012 年 12 月在紫金山天文台青海观测站完成安装。

GWAC 是中法合作 GRB 探测天文卫星 SVOM (Space Multi-band Variable Objects Monitor) 项目^[39]的关键地面设备, 全称为地面广角相机阵 (Ground Wide Angle Camera)。GWAC 系统在硬件架构上和“Pi of the Sky”类似, 每个赤道仪上安装 4 套广角 CCD 相机。但 GWAC 的规模更大, 每个站点部署 16 套系统, 相机总数达 64 个。整个相机阵列的综合视场可达 8000 平方度。15 s 曝光的 V 波段极限星等约为 16 mag。计划部署 2 个相同的站点, 其中 1 个为国家天文台兴隆观测基地。GWAC 将配合 SVOM 卫星上的 ÉCLAIR 探测器, 在 GRB 爆发前 5 min 和爆发后 15 min 内对相应的天区进行光学观测。

中国科学院新疆天文台与 LCOGT 项目合作, 计划在南山观测站建立一个 LCOGT 节点, 将部署 3 台 1 m 口径望远镜和 3 台 0.4 m 口径望远镜^①。此外, 云南天文台丽江观测站、国家天文台西藏羊八井观测站、国家天文台西藏狮泉河观测站都在计划部署程控望远镜设备。

软件方面。当前, 国内天文学界在软件领域的研究和开发力量仍然非常薄弱。2000 年前后国内才开始望远镜观测控制系统的研究与开发。国家天文台兴隆观测基地 BATC 施密特巡天望远镜、紫金山天文台盱眙观测站近地天体探测望远镜、云南天文台丽江观测站 2.4 m 望远镜都开展了一些工作, 形成了一些较原始的软件系统。郭守敬望远镜 (LAMOST) 经过十多年的努力完成了一套完整的观测控制系统 (OCS) 并投入实际观测。不过, 这些系统与产品等级的质量要求还有较大的差距, 尚没有形成对外推广的能力。此外, 光学、射电、高能天体物理等波段上业内通用的数据处理系统也基本没有中国的贡献。随着上述以及更多 RAO 和 RAON 项目的建设和数据密集型天文学研究的发展, 国内对软件研发的需求快速增加。这势必会逐步转变以往重硬轻软的传统观念, 推动国内天文学研究“软”(件)实力的增强。

5 RAON 逻辑架构

天文台和望远镜的设计建造可以说是一个充满创意的领域。世界各地的天文台和望远镜各具特色, 大多成为当地的一道风景。RAO 和 RAON 也同样如此, 从建筑外观到内部机械构造, 再到软件系统, 都充分展现着各自的特色。

^①http://english.xao.cas.cn/ev/201112/t20111220_80230.html

尽管在具体设计实现方面存在很大差异,但从 RAON 系统的功能着手,还是可以归纳出高度一致的逻辑架构。现代天文学研究已经进入数据密集型时代,RAON 是一个数据驱动的系统。以数据流为主线,一个 RAON 系统可抽象为数据采集系统、数据存储系统、数据处理系统、网络通信系统、管理调度系统 5 大部分,如图 1 所示。

5.1 数据采集系统

数据采集系统是 RAON 系统内所有直接参与数据采集活动部件的集合,包括望远镜、CCD 相机或其他终端仪器、气象站、全天相机、监控摄像头、GPS 等,几乎是所有硬件系统的总称。RAON 中各种硬件设备都可以看作是某种类型的传感器,无论是复杂的望远镜系统还是简单的温度传感器部件。这是一个异构的传感器网络,尽可能全面地采集与观测相关的各种数据和信息。

5.2 数据存储系统

数据存储系统用于临时保存由各类传感器产生的实时数据,存储、归档经过处理后的科学数据和工程数据。典型的数据有来自 CCD 相机或者摄谱仪等终端设备的观测数据,来自望远镜机电系统反馈的当前观测状态信息,气象站和各种探测器收集的环境信息等。

RAON 是一个数据驱动的系统。数据流在其中发挥着决定性的作用。数据存储系统不但存储未经加工的原始信息,还将存储经过数据处理流水线处理之后的信息。数据存储系统一般分为两级,RAO 本地存储系统和 RAON 全局存储系统。全局存储系统一般还会承担数据发布职责。

5.3 数据处理系统

原始数据必须经过有效处理才能充分发挥其科学价值。RAON 数据处理系统可分为两个层次:基本处理和数据挖掘。一套 RAON 系统中原始数据的基本处理都有相对固定的流程,为其实现一个数据处理的流水线 (pipeline) 是可行的。流水线系统一般通过计算机软件编程实现,输入为原始数据,输出为数据产品。流水线可以是在线的 (实时的),即数据产生后立即处理;也可以是离线的,即数据产生后先暂存在存储系统中,再由流水线系统将这些原始数据读出后处理,最后数据产品回归存储系统。数据挖掘是数据处理的高级阶段,也是“自主化”的重要体现。一个理想的 RAON 数据挖掘系统将可以完成对观测目标的识别、测量、特征刻画,具有对暂现源和时变事件的自动发现、分类等功能。

5.4 管理调度系统

管理调度系统相当于传统天文台中人的作用,起到管理、调度和决策的作用。理想情况下,整个网络有一个统一的调度决策系统,同时,在每个 RAO 上有一个本地的管理调度系统。两个层次的系统协同工作。整个 RAON 层面的管理系统主要工作是调度,即任务和资源分配。本地系统在调度的同时还肩负着保障自身物理安全的职责,在任何情况下都要保障自身是一个自洽、安全的系统。

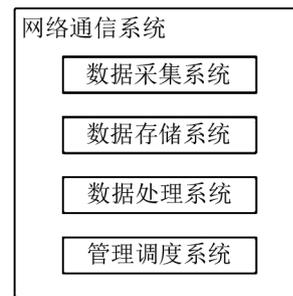


图 1 RAON 的逻辑架构

目前能适用于 RAON 的管理调度系统还很不成熟,大多数的努力仍集中在 RAO 的管理调度上。大口径、专业级的望远镜大多采用定制开发的管理调度系统,小口径、业余级的天文台更倾向于采用标准化、通用化的系统。定制的管理控制系统和设备接口在本文中不做过多论述。目前相对成熟和应用较为广泛的系统和设备接口主要有 ACP^①、RTS2^②、RCS、ATIS (Automatic Telescope Instruction Set)^[40]、OCAAS (Observatory Control and Astronomical Analysis Software)、AUDELA^③、ASCUM (ASTRONOMY COMMON OBJECT MODEL)、INDI (Instrument Neutral Distributed Interface)^[41]等。

RAO 以及 RAON 的自主观测能力很大程度上取决于管理调度系统的好坏。管理调度系统相当于神经中枢,控制着整个系统的运行、该系统与人以及该系统与其他系统之间的协同工作。考虑到 RAO 和 RAON 系统的复杂性以及天文观测需求的多样性,管理调度系统的设计实现是整个 RAO/RAON 系统最具挑战性的部分。

5.5 网络通信系统

网络通信系统在一个 RAON 网络中承担着每个 RAO 内部各组件之间、多个 RAO 之间、RAON 与天文学家之间以及 RAON 与天文事件报警网络之间的通信。网络通信系统对于构建一个数据驱动的 RAON 系统无疑是非常重要的。

RAO 和 RAON 充分利用了各种现代的通信技术和消息交换机制来实现自身的功能需求^[42]。网间通信协议主要有 CGI、HTTP、SOAP、RSS、XMPP 等;网内通信协议则有 CORBA^④、ICE^⑤等;消息交换机制包括 GCN^[43]、SkyAlert^[44]、AMON^[45]等,消息的编码格式有普通文本、IVOA VOEvent^[46]或者 RTML^{⑥[47,48]}等。

通信过程分为人机之间的通信和机器与机器之间的通信。前者可以通过通用的网络协议实现,如利用 HTTP 或 FTP 提交观测计划和下载观测数据等;后者则可以通过 GCN 以普通文本格式或者 SkyAlert 以 VOEvent 的 XML 格式实现消息传递。

Rob Seaman 等人从 IVOA VOEvent 框架的角度分析了时域天文学的工作模式架构后指出^[49],为了满足时域天文学的需求,传统的研究模式必须革新。新模式要覆盖从研究课题的提出到实验设计、望远镜任务调度、数据归档、流水线数据处理、新事件的发现、事件报告,再到程控望远镜的自动随动观测,以及最后观测结果的展示和分析这样一个完整的过程。

5.6 BOOTES 实例分析

从 1998 年 BOOTES-1 开光至今,经过 10 多年的探索研究,BOOTES 团队在程控自主天文台软硬件方面积累了大量经验。为了能有效地完成科学观测任务,BOOTES 所选用的每个硬件设备都经过了精心的考虑:能够快速反应、迅速移动的 ASTELCO NTM-500 直驱赤道

^①<http://acp.dc3.com>

^②<http://rts2.org>

^③<http://www.audela.org/>

^④<http://www.corba.org/>

^⑤<http://www.zeroc.com/ice.html>

^⑥<http://www.astro.physik.uni-goettingen.de/hessman/RTML/>

仪, 高性能的 Andor EMCCD 相机, 大靶面高分辨率的 APOGEE 全天相机, 性能稳定的 AXIS 监视摄像头, 以及其他各种为无人值守而加装的传感器设备, 还有一些定制化模块 (比如圆顶控制器和圆顶机械装置) 等。尤其重要的是 BOOTES 采用的管理调度系统 RTS2。

RTS2 即第二代远程望远镜系统 (Remote Telescope System, 2nd Version)^[50], 是一套基于 Linux 平台的集成化开源程控自主天文台控制系统, 已经成功运行于西班牙、美国、智利、阿根廷、新西兰、南非、捷克的 10 余套程控自主天文台上。RTS2 系统旨在实现完全由计算机来控制一个天文台的运行, 具备执行观测任务、保障指向正确、响应机遇目标 (ToO)、持续跟踪、发送数据、协助科学研究等功能。RTS2 能实现天文台运行的完全自主化, 从数据库中提取观测目标, 执行观测, 把观测图像的元数据保存到数据库中, 自动处理图像, 最后提供虚拟天文台方式的数据访问。

目前, BOOTES 在 RTS2 平台下运行时能够完成以下自主化的工作: 工作时段 (黎明、早晨、白天、黄昏、夜晚等) 的自动切换; 根据天气状况自动打开、关闭圆顶来开启或结束观测任务; 当晚观测计划的自动产生; 黄昏、黎明时平场的自动拍摄; 当有突发的 γ 暴等瞬变源观测任务时会自动中断当前观测任务去执行瞬变源观测; 观测结果、观测记录自动保存; 同其他 BOOTES 系列望远镜对同一目标协同观测; 等等。

下面以 BOOTES 网络为实例对上述逻辑架构做进一步的阐述。按照前文对 RAON 系统的架构分析, BOOTES 网络大致可以分为以下几个层次。

(1) 数据采集相关的基础硬件部分。为了满足硬件的可靠性、易用性以及鲁棒性的要求, BOOTES 系列的几台望远镜基本上统一采用经过长时间考验过的硬件, 包括圆顶机械及控制系统、全天相机、赤道仪、望远镜、相机 CCD、监视摄像头、气象系统等。所有这些硬件构成了 BOOTES 项目的实体部分, 是各种数据的源泉。表 1 列出了丽江观测站 BOOTES-4 天文台数据采集系统所涉及的硬件设备, 可以看作是一套 RAO 系统的典型配置。

表 1 BOOTES-4 数据采集系统构成

设备名称	设备型号	数据采集内容
望远镜	ASTELCO 0.6 m CFK Ritchey-Chrétien 超轻望远镜、ASTELCO NTM-500 新技术赤道仪、对扣全开式自动圆顶	天文观测数据
测光相机	Andor iXonEM+ 888 电子增强型 CCD 相机、Finger Lakes Instruments CFW 1-8 滤光片转轮系统、Asashi Spectra 天文滤光镜片	天文观测数据
全天相机	Apogee Alta U16M 科学级 CCD 相机、Nikkor 鱼镜头、防结露加热毯	全天监测数据
气象站	Eigenbrodt GMBH IRSS88 降水 (雨、雪) 强度计、Davis Instruments Vantage Pro 气象站、Mrakomer4 云量传感器	大气环境监测数据
GPS	标准串行口有源 GPS 接收器	标准时间信号
摄像头	两台 (圆顶内外) AXIS 221	工作环境监测数据

(2) 观测流程的控制。这一层次主要指的是能够驱动所有硬件正常工作, 并协调各个部分

使其完成一次基本观测任务的软件系统。在 RTS2 中,这一部分表现为控制各个硬件单元的 100 多个指令程序。把这 100 多个指令程序按照一定的逻辑规则有机地结合起来就形成了一个简单的望远镜控制系统。

(3) 任务调度与管理。在 RTS2 系统中,任务的调度与管理是通过以中控程序为核心,各种设备守护进程为基础,以及观测目标选择程序 (rts2-selector)、执行观测程序 (rts2-executor)、图像处理程序 (rts2-imgproc)、瞬变源消息触发程序 (rts2-grbd) 等相互配合完成的。RTS2 通过一套以遗传算法为基础的程序完成任务调度。有了这些,RTS2 系统可以解决多个目标共存时观测计划的制订问题,突发瞬变源观测请求的问题,以及由于云、雪、雨、雾等天气环境变化引起的信息采集以及硬件控制(如关闭圆顶)问题等,基本上实现了自主化观测。下一步,RTS2 将加入对整个 RAON 进行管理调度的功能。

(4) 数据的在线分析、存储与发布。和所有望远镜一样,BOOTES 望远镜的直接产品是未经处理的原始观测数据。目前 BOOTES 的 pipeline 数据处理程序是和观测程序分离的,相当于是离线处理模式。但 RTS2 提供了一个在线预览观测结果的通道,通过网页的方式可以按照观测目标或按照观测日期来查看。实时的气象信息和各个硬件的状态信息采集后会记录到数据库中,汇总后显示在网页上。数据使用者可以通过网页查看到所关注的的数据,然后通过其他通道下载完整的观测数据。BOOTES 各个望远镜采用本地存储方式来保存当地天文台采集的数据,事后通过互联网将数据有选择地传输到西班牙的项目总部。科学研究结果由总部统一发布。

(5) 网络通信系统。BOOTES 系统中的网络通信在 RTS2 的环境下实现。RTS2 的通信系统分为内部通信和外部通信系统两部分。基于 TCP/IP 套接字(Socket)RTS2 自定义了一套内部通信协议^[51]。这套协议通过发送和接收 ASCII 码字符串指令完成整个通信过程。以 RTS2 的内部通信协议为平台,各个硬件设备、传感器件可以实现互联和信息的传递,共同完成自主观测任务。RAO 观测单元间以 XML-RPC 协议进行信息沟通。在 RTS2 网络架构的上层,以 XML-RPC 协议为基础,可以很方便地实现 GUI 和网页客户端的应用。多个这样的以 RTS2 为平台的 RAO 也可以通过 XML-RPC 协议实现互联,形成一个全球范围内的 RAON 网络。除上述自定义协议外,RTS2 还考虑了套接字、串口等典型外部设备的接口问题。有需要时,可以通过 RTS2 预留的套接字、串口等程序把外部信息融合进来,实现信息沟通。

RTS2 的外部通信指的是基于 RTS2 的 RAO 或 RAON 与外界的信息沟通。RTS2 支持 GCN 事件触发实现望远镜的随动观测并正在加入对 IVOA VOEvent 消息交换机制的支持。

6 RAON 的应用领域

RAO 的研究和应用源自自动测光功能的实现,变源监测是其早期最重要的应用,后来 GRB 随动观测越来越成为应用主流。现在,RAO 和 RAON 的应用领域已经相当广泛。HTN 设想的提出者 Frederic Hessman 基于其收集的全球 RAO 项目的资料给出了一个不完全的统

计, 如表 2 所示^①。

表 2 RAO 的科学应用

研究领域	涉及项目数	所占比例
GRB	32	20.10%
伺服观测	28	17.60%
光变监测	16	10.10%
教育	20	12.60%
全天巡视	12	7.50%
系外行星探测	19	11.90%
超新星搜寻	11	6.90%
小行星	10	6.30%
光谱观测	4	2.50%
天体测量	4	2.50%
活动星系核和类星体	4	2.50%
微引力透镜	1	0.60%
其他用途	8	5.00%

受益于可进行自主观测的特点, RAON 特别适用于时变过程和暂现事件的观测, 例如掩食现象、光度变化、超新星爆发、GRB 等, 进而激发并推动了时域天文学的发展。GRB 属于突发性事件, 很难预测。GRB 的随动观测要求响应迅速, 后续结果的分析处理也相对独立, 成果发表快, 所以成为很多 RAO 系统的首选观测目标^[52]。对掩食现象的观测为系外行星的发现、外星生命的搜寻乃至天文生物学的发展都起着重要促进作用。

程控自主天文台在选址和台址环境监测领域也有较为广泛的应用。为了对南极冰穹 C 的大气进行监测, 开展选址工作, 意大利、法国等联合建造了一架 80 cm 口径的国际程控南极红外望远镜 (International Robotic Antarctic Infrared Telescope, 简称 IRAIT)^[53]。中国西部天文选址计划也准备利用具有自主观测能力的 DIMM 系统实现对大气视宁度的自动监测。

科普教育是程控自主天文台另一个很重要的应用领域, LCOGT、MONET、BRT 是典型的代表。作这一用途时, 程控望远镜通常以两种方式运行: 遥控模式和伺服模式。遥控模式由用户在远端直接控制望远镜, 通过网络摄像头等方式检查天气情况; 观测者有控制望远镜的权力, 其他人可以观摩系统的运行; 望远镜观测完毕, 观测者可以立即得到图像; 这种方式比较适合于实时演示和教学。伺服模式中用户提出观测请求, 观测由望远镜自主执行, 然后返回结果; 这种方式不太直观, 但有利于提高工作效率, 比较适合于研究生层次的科研型教学。

^①<http://www.astro.physik.uni-goettingen.de/hessman/MONET/links.html>(最后访问时间 2013.03.03)

7 RAON 的技术挑战

一个 RAO 系统可以看成是在传统天文台观测系统上附加了丰富的传感器和智能控制功能而形成的新系统；一个 RAON 系统则可以看成是在多个 RAO 系统基础上通过网络来实现通信和协同工作的更高级系统。虽然当前声称是程控自主天文台的系统已经超过 100 多套，但真正实现完全自主运行的屈指可数；这从客观上反映出 RAO 对技术的挑战非常多，要真正实现难度很大。RAON 所面临的挑战大部分是为了满足“A”，即“自主”的需求而产生。为了实现自主运行，必需逾越系统安全、自主决策、数据处理这三个方面的挑战。

首先是系统安全。著名科普作家阿西莫夫曾在 1942 年提出了“机器人三定律 (The Three Laws of Robotics)”，其中保护自己这一条也适用于 RAO 和 RAON。天文台的正常运行依赖于每个部分和部件的正常工作。做到每个零部件都绝对可靠本身就是一个挑战。在无人值守的情况下运行，天气、地质、人为、野生动物、昆虫等因素都可能给系统带来威胁和破坏。RAON 的智能控制系统必须具有足够的自我诊断、自我防护乃至自我修复功能。系统安全的保障除了各部件、各系统的精心设计、制造和维护，丰富的运行管理经验也非常重要。

REM 全称为 Rapid Eye Mount(REM)^①[54-56]，是一架用于观测掩食现象的望远镜，口径 60 cm，配备有可快速跟踪的赤道仪、高效率的近红外 (Z、J、H、K 波段) 相机，安装在欧洲南方天文台智利拉西亚观测站。REM 是第一台可同时覆盖可见光到近红外 (0.45~2.3 μm) 的 60 cm 口径程控望远镜。REM 的管理调度系统不但自动执行科学观测，还对自身进行着持续的监测。在某种程度上，它可以自我诊断，对一些功能失效做出响应，在一些情况下能够以降级的模式继续观测^[57]。

为了建设和运行的方便，大多数 RAON 都采用相同或者类似的软硬件设备。但是，RAO 运行中还会出现各种非常具体的难题，比如：

- (1) 指向精度和跟踪精度问题。例如，为了保证指向精度，HAT 每小时让赤道仪复位一次。
- (2) 电磁干扰问题。计算机系统天生具有低电压和对电磁噪声敏感的特点，这为用计算机控制机电设备带来诸多麻烦。
- (3) 自动调焦问题对于自主天文台而言也是一个挑战。

其次是自主决策。在系统安全得以保障的前提下，结合科学目标、观测条件、自身能力等诸多约束因素，如何让整个系统和网络以最优的方式来运行，这是一项系统最优化和人工智能领域很值得研究的课题，也是最体现一个 RAON 管理控制系统水平之处。智能管控系统的设计开发是 RAON 系统的核心技术。观测自动化的进程经过 40 多年的发展已经逐步成熟，RAO 的架构也基本成形；但由多套 RAO 系统组网运行的 RAON 还处在早期发展阶段。

HATSouth 声称是第一个投入运行的网络，但各个 RAO 之间的联系还相当松散。HATSouth 自己开发了一套管理系统，称为“Virtual Observer(VO)”，与底层的赤道仪、气象站、相机等控制程序以及数据库相连。系统状态分为日间睡眠 (daysleep)、运行 (run)、天气睡眠 (weather-

^①REM (Rapid Eye Mount). <http://www.rem.inaf.it/>

sleep)、挂起 (suspend) 这 4 种基本状态。系统没有在作业调度这个复杂问题上过多涉及, 只提供了最基本的任务执行流程。观测任务制订由人工来分配。

尽管 BOOTES 项目已经在 3 个国家完成了 4 个站点的建设, 但这 4 个站点之间还尚未建立起内在的联系和协同工作机制。RTS2 把对整个 RAON 网络的智能管理和控制功能纳入下一步的开发规划, 但还没有具体实现。因此, 目前 BOOTES 只能称为是 RAO 的集合, 而不是一个严格意义上的 RAON。

再次是数据处理。观测是自主完成的, 后续的数据处理自然地也要求尽可能自动化和智能化。人工数据处理中遇到的麻烦这里全都适用, 并且得到再次的加强。在无监督情况下完成数据的收集、归档、处理, 完成数据的分析、分类、特征刻画等工作, 每项任务都具有挑战性。

最新的信号探测技术和信息技术开启了天文学研究的时域时代。RAO 和 RAON 激发了天文学家对时变过程的研究热情, 时域天文学的发展也带来了许多新的挑战^[58]。RAO 和新一代概要式巡天是时域天文学时代的两个重要代表。概要式巡天项目, 比如 LSST^①和 SKA^②, 将每晚对大面积的天区进行快速扫描以发现各种变化事件。RAON 则对有价值的暂现事件展开随动观测以获得进一步的信息。程控望远镜数据收集速度较传统观测模式有数百上千倍的提高。数据联合使得数据复杂性大幅度增加, 用于分类和决策的数据挖掘算法在这种情况下也必须全面革新。在带来新科学机遇的同时也伴随着全新的挑战, 这是一个典型的计算机应用、信息技术和天文学交叉的领域。

异构数据再加上暂现天文事件为数据管理和分析带来全新挑战。时域天文学面临最具挑战性的任务是海量数据流的实时挖掘。科学产出不仅依赖于探测到与否, 还需要及时而准确地随动观测和数据分析。这就需要快速处理概要巡天产生的海量数据流, 与以后的数据进行比对, 找出各种变化的情况, 对这些情况进行分类和特征提取, 并给出随动观测的优先级。很多科学领域也面临着类似的情况。海量数据从科学仪器和传感器网络中不断地产生, 异常事件和有价值的情况必须及时探测和发现, 并迅速触发相应的动作。卡塔莉娜实时瞬变源巡天 (Catalina Real-Time Transient Survey, 简称 CRTS)^③针对概要式巡天项目在瞬变事件的自动分类、优先级评估等方面面临的挑战开展了大量的研究工作, 为 LSST 和 SKA 等下一代更大型的项目做技术储备^[59]。

今后大部分的天文观测设施都将利用新的信息技术进行自动化改造。观测以 RAO 方式进行, 高级工作流完成对数据的处理, 智能管理控制系统依据掌握的信息评估、决策并执行下一步的行动, 最终的目标是取得更多的科学发现, 但每一步都充满着挑战。

①<http://www.lsst.org/>

②<http://www.skatelescope.org/>

③<http://crts.caltech.edu>

8 总结和展望

程控自主天文台网络集成了传统的天文台硬件和软件系统、远程控制技术、传感器网络技术、数据自动处理技术、智能作业调度和消息传递技术、虚拟天文台技术,等等,是天文仪器、信息技术、自动控制、人工智能等领域综合交叉的一个制高点。随着技术不断走向成熟,越来越多的 RAON 系统投入运行, RAON 所激发的时域天文学,特别是 GRB、变源监测、超新星/小行星/系外行星/微引力透镜搜寻等这些 RAON 擅长的科学领域将得到更快的发展。

2012年8月,在北京举行的第28届国际天文学联合会大会上,中国政府领导人提出将加大在天文领域的投入,支持诸如南极天文台、西藏天文台的建设。中国也将大力加强国际合作,支持 SONG 项目、SVOM 项目的实施,加大对天文教育的扶持力度等。这些台站的建设和项目的实施对 RAO 和 RAON 及其背后所倚仗的自主观测、智能控制、数据自动处理与分析等技术提出了强烈的需求,反过来这也将无疑将对国内 RAO 和 RAON 科学与技术的发展发挥积极的推动作用。

中国地域辽阔,有着独特的地理优势。在任何一个全球性的 RAON 系统设计时中国都是一个无法忽视的区域。RAON 本身就带有全球合作的内在属性和要求。充分利用我国的地理优势、技术优势,从积极参与国际上的 RAON 项目着手,消化、吸收、创新,逐步提升我国在 RAO 和 RAON、时域天文学、天文信息学等方面的研究实力,是一种切实可行的发展思路。

致谢

感谢中国虚拟天文台 (China-VO) 研发团队和国家重大科学工程计划郭守敬望远镜 (LAMOST) 对本工作的支持。本论文得到中国天文数据中心提供的数据资源支持。中国天文数据中心得到国家科技基础条件平台建设项目“地球系统科学数据共享平台”和“基础科学数据共享网——理化天文空间生物”的支持。感谢法国斯特拉斯堡天文数据中心 Mark Allen 博士校对本文的英文摘要。

参考文献:

- [1] Bernardini E. *Science*, 2011, 331: 686
- [2] York D G, Wang L F, Pennypacker C, et al. *Time Domain Research in Astronomy, White Paper for the 2009-2010 Decadal Survey Committee*. <http://www8.nationalacademies.org/astro2010/DetailFileDisplay.aspx?id=370>. 2009
- [3] McNall J F, Miedaner J L, Code A D. *AJ*, 1968, 73: 756
- [4] Genet R M. *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication*, 1986, 25: 1
- [5] Helmer L, Morrison LV. *Vistas in Astronomy*, 1985, 28: 505
- [6] Genet R, Boyd L J, Kissell K E, et al. *PASP*, 1987, 99: 660
- [7] Baliunas S, Boyd L J, Genet R M, et al. *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication*, 1985, 22: 47
- [8] Baruch J. *Astronomy & Geophysics*, 2007, 48: 427
- [9] Downey E C, Mutel R L. *The university of Iowa automated telescope facility*. G. H. Jacoby and J. Barnes, eds. *ASP Conference Series*, 1996, 101: 380
- [10] Steele A, Naylor T, Allan A, et al. *Proceedings of the SPIE*, 2002, 4845: 13

- [11] Tsapras Y, Street R, Horne K, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2009, 330(1): 4
- [12] Hessman F V. *Astron. Nachr*, 2006, 327(8): 763
- [13] Akerlof CW, Kehoe R L, McKay T A, et al. *PASP*, 2003, 115: 132
- [14] Castro-Tirado A J, Soldán J, Bernas M, et al. *A&AS*, 1999, 138: 583
- [15] Klotz A, Boer M, Eysseric J, et al. *PASP*, 2008, 120: 1298
- [16] Kornilov V, Lipunov V, Gorbovskoy E, et al. *Experimental Astronomy*, 2012, 33(1): 173
- [17] Lipunov V, Kornilov V, Gorbovskoy E, et al. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 349171
- [18] Hessman F. Robotic telescope projects, <http://www.astro.physik.uni-goettingen.de/~hessman/MONET/links.html>, 2013
- [19] Bakos G A, Csabry Z, Penev K, et al. <http://arxiv.org/pdf/1206.1391v1.pdf>, 2013
- [20] Konacki M, Kozłowski S, Sybilski P, et al. American Astronomical Society, ESS meeting #2, 2011, #20.02, 2, 2002
- [21] Kim S L, Park B G, Lee C U, et al. Technical specifications of the KMTNet observation system. Ground-based and Airborne Telescopes III. Stepp L M, Gilmozzi R, Hall H J, eds. *Proceedings of the SPIE*, 2010, 7733: 77333F
- [22] Castro-Tirado A J. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 570489
- [23] Hartman J D, Bakos G Á, Stanek K Z, et al. *AJ*, 2004, 128(4): 1761
- [24] Bakos G Á, Noyes R W, Kovács G, et al. *PASP*, 2004, 116: 266
- [25] Pojmanski G. *Acta Astronomica*, 1997, 47: 467
- [26] Katarzyna M, Tadeusz B, Henryk C, et al. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 194946
- [27] Majcher A, Sokolowski M, Batsch T, et al. Present status of Pi of the Sky telescopes. Romaniuk R S, ed. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8008: 80080Y
- [28] Nawrocki K, Ptasińska M, Sokołowski M, et al. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 560378
- [29] Grundahl F, Christensen-Dalsgaard J, Kjeldsen H, et al. Solar-Stellar Dynamos as Revealed by Helio- and Asteroseismology GONG 2008/SOHO 21. Dikpati M, Arentoft T, Herríandez T G, et al, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2010, 416: 579
- [30] Grundahl F, Kjeldsen H, Frandsen S, et al. *MmSAI*, 2006: 458
- [31] Chou D Y, Sun M T, Fernandez F, et al. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 125340
- [32] Tsapras Y, Street R, Home K, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2009, 330: 4
- [33] Fraser L, Rachel S, Paul R, et al. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 873059
- [34] Street R, Lister T A, Tsapras Y, et al. *IAU Symposium*, 2010, 285: 408
- [35] Guziy S, Kubanek P, Fan Y F, et al. GRB Coordinates Network, 2012, 13286: 1
- [36] Tello J C, Kubanek P, Gorosabel J, et al. GRB Coordinates Network, 2012, 13080: 1
- [37] Cui C Z, Zhao Y H. *IAU Symposium*, 2008, 3: 563
- [38] 李建, 崔辰州, 赵永恒, 等. 基于 RTS2 的 RAO 管理系统二次开发. *天文研究与技术*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/53.1189.P.20121112.0945.002.html>, 2013
- [39] Paul J, Wei J Y, Basa S, Zhang S N. *Comptes Rendus Physique*, 2011, 12(3): 298
- [40] Boyd L J, Epan D, Bresina J, et al. *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication*, 1993, 52: 23
- [41] Downey E C. INDI: Instrument-Neutral Distributed Interface, Protocol Version 1.7, Document Version 1.3. <http://www.clearskyinstitute.com/INDI/INDI.pdf>, 2013
- [42] Klotz A. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010: 496765
- [43] Barthelmy S D, Cline T L, Butterworth P, et al. GRB Coordinates Network (GCN): A status report. Meegan C, Preece R, Eds. *AIP Conference Proceedings*, Springer, Berlin, Germany, 2000, 526: 731
- [44] Williams R D, Djorgovski S G, Drake A J, et al. Skyalert: Real-time Astronomy for You and Your Robots, ADASS XVIII ASP Conference Series. Bohlender D A, Durand D, Dowler P, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009, 411: 115
- [45] Smith M W E, Fox D B, Cowen D F, et al. <http://arxiv.org/pdf/1211.5602v1.pdf>, 2013
- [46] Williams R, Seaman R, Allan A, et al. <http://arxiv.org/pdf/1110.0523v1.pdf>, 2013
- [47] Pennypacker C, Boer M, Denny R, et al. *A&A*, 2002, 395: 727
- [48] Hessman F V. *Astronomische Nachrichten*, 2006, 327(8): 751
- [49] Seaman R, Allan A, Pierfederici F, et al. Architectures for Time-domain Astronomy. Bohlender D A, Durand D, Dowler P, eds. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2009, 411: 547
- [50] Kubanek P. *Advances in Astronomy*. 2010, 2010: 902484

- [51] Kubánek P, Jelinek M, French J. The RTS2 protocol, Bridger A, Radziwill N M, eds. Proceedings of the SPIE, 2008, 7019: 70192S
- [52] Castro-Tirado A J. Lecture Notes and Essays in Astrophysics, 2008, 3: 131
- [53] Gino T, Maurizio B, Giuliano N, et al. Proc. SPIE, 2006, 6267: 62671H
- [54] Zerbi F M, Chincarini G, Ghisellini G, et al. SPIE, 2003, 4841: 737
- [55] Zerbi F M, Chincarini G, Ghisellini G, et al. SPIE, 2004, 5492: 1590
- [56] Molinari E, Covino S, D'Alessio F, et al. Advances in Astronomy, 2010, 2010: 253675
- [57] Stefanon M, Covino S, Fugazza D, et al. Advances in Astronomy, 2010, 2010: 976890
- [58] Graham M J, Djorgovski S G, Mahabal A, et al. Distributed and Parallel Databases. 2012, 30: 371
- [59] Mahabal A, Djorgovski S G, Drake J, et al. Bulletin of the Astronomical Society of India, 2011, 39: 387

Robotic Autonomous Observatory Network Review

CUI Chen-zhou¹, LI Jian¹, CAI Xu¹, FAN Yu-feng², WANG Feng³,
CAO Zi-huang¹, SU Li-ying⁴, FAN Dong-wei¹, QIAO Cui-lan⁵,
HE Bo-liang¹, LI Chang-hua¹, ZHAO Yong-heng¹, CHEN Yue¹,
WANG Chuan-jun², XIN Yu-xin², BAI Jin-ming², JI Kai-fan³

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 4. Beijing University Of Technology, Beijing 100021, China; 5. Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Developments in telescopes, detectors and software have greatly enhanced our ability to make astronomical observations. Powerful astronomical observation is very sensitive to its working environment, requiring it to be quiet as much as possible. Rapid urbanization over the past century has impacted this environment such that astronomical observations now suffer from light, air and electromagnetic pollution. To obtain better observational data and generate more scientific discoveries, astronomical observatories are forced to migrate to remote places or even into space. As a result of the migration, and the global nature of astronomy, observatories and scientific data are widely distributed. Meanwhile, multiband astronomy and time-domain astronomy are becoming popular fields in astronomy in the 21st century, both of which are based on federation of multiband and multi-time scientific datasets.

Robotic Autonomous Observatory (RAO) and RAO Network (RAON) provide a science driven and technique enabled way to address the above problem. With the development of information technology and computer science as well as electro-mechanics, the automation of astronomical observation is undergoing rapid development, and consequently long term unsupervised observation is made possible. This becomes what we call "Robotic Autonomous Observatory". Following from this is the idea of connecting multiple robotic autonomous observatories via a robust computer network

and making them interoperate. The connected system, namely “Robotic Autonomous Observatory Network”, will enable observation around the clock in respect to a given object or covering large areas on the sky repeatedly, and the completeness of observations in time and space domains could be largely guaranteed.

Time domain astronomy and data intensive astronomy are being enabled by the advent of the new autonomous observation mode and synoptic sky surveys, which brings both new scientific opportunities and fresh challenges. This paper reviews the historical perspectives of robotic autonomous observatory network. Several ongoing global RAON projects with early efforts in China are described briefly. The 5-layer architecture of RAON is summarized following the concept of a data-driven system, i.e. data harvest system, data archive system, data processing system, management and scheduling system, and network and message exchange system. BOOTES (Burst Optical Observer and Transient Exploring System) is introduced as an example to provide a deeper understanding of the architecture. Scientific applications of RAON are summarized briefly. Technical challenges facing the RAON are classified in terms of autonomous observation, scheduling, and data mining. Finally, requirements and development strategies on RAON are discussed.

Key words: robotic autonomous observatory; telescope network; autonomous observation; time-domain astronomy

《天文学进展》2013 年征订启事

《天文学进展》是天文学类中文核心期刊。刊物为季刊, 2013 年本刊于 2、5、8、11 月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年 160 元 (含邮寄费和包装费)。凡需订阅 2013 年《天文学进展》, 请到所在地邮局进行订购。

统一刊号: CN 31-1340/P

邮发代号: 4-819

欢迎订阅! 谢谢支持!

《天文学进展》编辑部