

文章编号: 1000-8349(2007)04-0346-18

干涉技术在天体测量中的应用

金文敬

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 介绍了射电、光学和红外波段地面干涉的仪器以及近期的进展, 如厘米波段的 VLBA、EVLA、SKA 等; 毫米波段的 ALMA、CARMA 等; 光学波段的 Keck、VLTI/PRIMA、CHARA、Mark III、NPOI、LBTI 等。叙述了目前干涉技术在空间天体测量中应用的一些研究项目, 如射电波段的 VSOP、iARISE、RadioAstro; 光学波段的 HST/FGS、SIM PlanetQuest 等。探讨了干涉技术在天体测量中的有关研究课题, 并概述了其在我国的发展和应用情况。

关键词: 天体测量学; 干涉技术; 天球参考架; 地外行星; 双星
中图分类号: P129 **文献标识码:** A

1 引 言

天体测量学是天文学中最先发展起来的分支学科。主要任务是研究和测定天体的位置和运动、参考系的定义和实现、参考架的建立和维持, 以及在其他学科中的应用。20 世纪末由于新技术、新仪器的使用、新参考架的引入和广义相对论的应用, 天体测量已进入全新的发展阶段: 检测器 CCD 代替了传统的照相底片, 光干涉方法取代了经典的子午观测技术, 依巴谷卫星的发射成功显示了空间天体测量时代的开始, 射电干涉测量实现的河外射电参考架取代了使用近百年的光学参考架, 在相对论框架下进行资料归算可以使天体测量的精度达到微角秒量级^[1]。本文主要描述干涉技术在天体测量中的应用。在第 2 章中介绍正在实施的地面光学、射电波段的干涉仪研究计划; 第 3 章描述在光学、射电波段空间干涉仪计划; 第 4 章简述用这些干涉仪正在进行的天体测量课题; 最后, 简述我国开展干涉仪研究方面的情况。

2 干涉技术在地面天体测量中的应用

众所周知, 由于望远镜口径、大气的湍动和光学衍射的影响, 天文望远镜的角分辨率受到限制, 因此既不可能利用传统的光学技术直接测定恒星的角直径(小于 $0.05''$), 更不能用来研

收稿日期: 2006-11-12; 修回日期: 2007-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(10333050、10373021); LAMOST 工程课题(合同号 00BJK003); 中国科学院知识创新重要方向项目(KJ CX2-SW-T1), 上海市科学技术委员会资助项目(06DX22101)

究恒星表面的细节(如亮度分布等)。1868年法国 Fizean 最早提出了用光干涉的方法测定恒星直径的想法,但是受到条件的限制,实验没有获得成功。基于 Fizean 的思路,1881年美国 Michelson 用 Lick 天文台 30 cm 折射望远镜成功地测定了木星的 4 个伽利略卫星的直径。1920 年人们又设计了新型结构的干涉仪,即现在的 Michelson 恒星干涉仪。用此装置在威尔逊山 2.54 m 的望远镜第一次测定太阳系外 6 颗恒星的角直径,得到其大小为 $0.020'' \sim 0.047''$, 以后又发展了单口径大望远镜的干涉技术(如斑点干涉仪^[2]),使光干涉技术有了进一步的发展。

随着科学技术的发展,1967 年长基线干涉技术首先在射电波段获得成功。现在采用的 ICRF(International Celestial Reference Frame) 和 AGN 的视超光速现象的发现就是利用该技术取得的重大成果。射电和光学波段的长基线干涉仪大部分采用了 Michelson 干涉原理,由于可见光的波长比射电的波长短得多,大气的高频扰动和仪器本身的稳定性对光程差的影响很大,技术上的难度使光干涉的发展比 VLBI 迟了 20 多年,至 20 世纪 70 年代末长基线光干涉在技术上才有所突破,在 20 世纪 80 年代有了较大的进展。1974 年法国 Labeyrie 首次用 I2T(2-Telescope Interferometer),即用 2 个口径为 26 cm 的望远镜安放在 12 m 的南北基线上得到了织女星的干涉条纹。长基线光干涉仪可以在干涉和综合孔径两个模式下工作,前者从大视场和小视场的定位观测可以得到有关恒星的直径、双星的间距和方位角、天体的位置等数据;后者为成像观测,可以得到射电源和恒星表面的细节(喷流、黑子、耀斑)和亮度分布等。下面将分别介绍目前正在实施的射电和光学波段的地面干涉仪和研究计划,也简述了其在天体物理方面的应用^[3]。

2.1 地面的射电干涉技术

2.1.1 厘米波的射电天线

地面的射电天线有的采用单面或平方公里阵,如大家熟知的 Arecibo(305 m, 美国)、Effelsberg(100 m, 德国)、GBT(Green Bank Telescope 100 m, 美国)、Parkes(64 m, 澳大利亚)、Nancay(35 m×300 m, 法国)、LOFAR(Low Frequency Array, 直径 400 km, 荷兰与美国合作)、SKA(Square Kilometer Array, 11 个国家参与的国际合作)等,也有的采用多个天线和干涉技术,以增加灵敏度和覆盖面,构成一个射电望远镜的观测网或一架综合孔径射电望远镜,具体情况如表 1 所示。

表中的干涉仪在参考文献中都有详细的介绍,本文不再赘述,这里仅介绍近年来的进展:

1) 南美秘鲁的 Sicaya 32 m 天线将加入 VLBA,以便改进观测近赤道源的 UV 覆盖^[17]。VLBA 已进行了 VLBA Calibrator(2.3, 8.4 GHz) 巡天、VLBA 2cm 巡天(15 GHz) 和 VSOP pre-launch 巡天(5 GHz) 等巡天计划和脉冲星的观测,从 2002 年起 NASA、USNO、NRAO 和法国 Bordeaux 天文台开展了扩充 ICRF 至高频 K(24 GHz) 和 Q 波段(43 GHz) 的合作计划^[18]。

2) 2004 年美国启动 EVLA(Expanded Very Large Array) 计划^[13],对原有的 VLA 进行技术更新,拟增加 8 个新的天线和 2 个 VLBA 天线,整架仪器由 37 架 25 m 天线组成。频率覆盖 1~50 GHz,接收机的频道由 6 个增加至 8 个,灵敏度为 $1 \sim 2 \mu\text{Jy}$,角分辨率为 $0.01''$ 。加拿大研制新的相关处理机,至少有 16 384 个通道,最多可达 4×10^6 个通道,具有相位阵(phased-array)、亚阵(sub-arraying) 和 VLBI 处理的能力。改进后的 VLA 科学能力可增加 10 倍,计划将在 2012 年完成。它可用于开展天体物理方面的研究,如通过背景源法拉第旋转的测量绘制星系团内磁场的结构,年轻和原恒星的成像,深空光谱线的巡天,每年寻找 100 个 GRB 等。也能进行天体测量方面的研究,可以用于寻找致密的射电源,以便对 ICRF 加密。总之,

EVLA 是天文研究中多波段、增效的设备, 今后可将 EVLA/NMA(New Mexico Array)/VLBA 看作一个仪器, 基线长度为 25 m~8 600 km。

表 1 大型厘米波干涉望远镜

计划	国家	孔径	波长 /cm	角分辨率 /(")	参考文献
ATCT(ATNF)	澳大利亚	6×22 m	0.3~20	0.1	[4]
GMRT	印度	30×45 m	21~300	2	[5]
1HT	美国	500×5 m	3~30	3	[6]
MERLIN	英国	6×(25~76) m	1.3~200	0.01	[7]
VLBA	美国	10×25 m	0.4~90	10 ⁻⁴	[8]
EVN	欧、亚、非	18 架天线	1.35~92	6×10 ⁻⁴	[9]
VLA	美国	27×25 m	0.7~400	0.04	[10, 11]
Westerbork	荷兰	14×25 m	6~150	4	[12]
EVLA	美国	37×25 m	0.7~20	0.007	[13]
VERA	日本	4×20 m	0.7~15	9×10 ⁻⁴	[14-16]

注: 上述仪器的全称分别为 ACTA(Australia Telescope Compact Array)、GMRT(Giant Metrewave Radio Telescope)、1HT(One Hectare Telescope)、MERLIN (Multi-Elements Radio-Linked Interferometer Network)、VLBA(Very Long Baseline Array)、EVN(European VLBI Network)、VLA(Very Long Array)、EVLA(Expanded Very Large Array)、VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)。孔径一列中 6×22 m 表示 6 架 22 m 天线

3) 爱尔兰 32 m 的望远镜 ARTI(A Radio Telescope for Ireland) 将进入 MERLIN 网^[19]。1978 年 MERLIN 开始 50 颗射电星的观测, 这是将河外参考架与依巴谷参考架联系的 4 个方法之一, 现在又有 VLA 和 VLBA 的 Pie Town 干涉仪^[20] 加入该项工作。

4) 1997 年发表了 FIRST(Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters) 巡天星表, 其中包括 138 665 个射电源的图像^[21], 它是一本厘米波段的 POSS(Palomar Observatory Sky Survey) 星表。将 FIRST 与 SDSS 比较可得到河外源的射电和光学图像的特征^[22]。

5) SKA^[23,24]

SKA 是 11 个国家参加的国际合作计划, 21 世纪头十年发展有关技术, 2010—2020 年研制。此望远镜在米波至厘米波段的灵敏度是现有设备的 2 倍, 接收面积是 VLA 的 100 倍, 其中接收面积为 90 m 望远镜有 150 个和相应 200 m 直径望远镜有 30 个。接收频率为 0.1~25 GHz。该计划的科学目标有 5 个方面: 生命起源, 宇宙磁场的起源和演化, 用脉冲星和黑洞做重力强场测试, 星系演化、宇宙学和暗能量, 暗年龄的探测。2004 年 Fomalont 和 Reid 提出了 SKA 的微角秒天体测量, 要求在 SKA 中央区 1 000~5 000 km(占 SKA 一百万平方米接收面积的 25%) 范围内建立 10 个子阵, 每个子阵至少有 6 个望远镜。为了增加基线长度, SKA 也可以与现有大望远镜联合进行 VLBI 观测, 至 2020 年, 与轨道射电望远镜联合观测, 基线可达 1 000 000 km。

SKA 在天体测量方面的课题有: (1) 参考架的改进; (2) 地球和太阳系力学, 如地球的自转和指向、章动、河外参考架与力学参考架的联系; (3) 基本物理的检验, 如射电波经过太阳和木星的弯曲, 飞船信号延迟检验爱因斯坦重力理论, 重力波的检测; (4) 距离的测定。前面 3 个课题属于大视场天体测量, 仅要求在短时间内全天观测强致密源。现在 VLBI 阵的望远镜少, 只限于观测少数强源, 因此不能很好地决定对流层解。SKA 有 10 子阵, 可以同时观测 10 个天区, 5 分钟内测定对流层的特征, 观测精度可提高至 0.025 mas, 是现有精度的 10 倍,

轴指向的稳定性为 0.002 mas 。SKA 可观测以下各种天体: (1) 银河系天体。如观测强度大于 0.5 mJy 的射电星, 1 kpc 内 $25 \mu\text{Jy}$ 弱源, OH、 H_2O 、SiO 脉泽的跃迁线、脉冲星。用 SKA 观测 1 mJy 强源 1 h , 所得位置精度可为 $3 \mu\text{as}$, 因此可以检测 30 Mpc 范围内银河系天体的视差、自行和星系的旋转速度。对毕星团和昴星团内源的视差测定可以改进宇宙距离尺度的零点和校正造父变星的周光关系。SKA 直接测定太阳的银心距 R_0 , 精度为 1% , R_0 直接影响银河系内所有天体的质量和亮度。还可检测双星的轨道运动, 以便发现地外行星。(2) 近距的河外天体。直接测定 LMC 和比 Virgo 更远的河外星系的距离, 可以改进距离尺度至 1% 。虽然 SKA 只能直接测定 LMC 的视差, 但是用 SKA 几年的观测, 可以测定河外星系中脉泽源旋转而引起的自行 ($5\sim 100 \mu\text{as/a}$), 将其与已知角速度的星系比较就可求得距离。其测定至 30 Mpc 处距离的精度为 1% 。观测 OH 和 H_2O 巨脉泽可以将测量距离扩展至 100 Mpc 。(3) 远距的河外天体。类星体和 AGN 的成像观测是研究恒星的形成过程的手段, 这些天体结构的变化对其位置精度的影响在天体测量方面也非常重要, SKA 测定的位置精度好于 $10 \mu\text{as}$, 能测定 AGN 核的位置变化 (约 0.05 mas)。

俄罗斯 QUASAR、中国 VLBI 网等也取得一定的进展。为了提高灵敏度和分辨率, 对现有的 VLBI 网进行扩充和应用新技术, 如 VLA 扩充为 EVLA、e-MERLIN、e-VLBI、硬盘的 VLBI 记录等。为了观测 AGN 的致密区、等离子效应, 如法拉第旋转和在电离 ISM(interstellar medium) 中无线电波的散射等, 厘米 VLBI 正在向 2 mm 和 1 mm 波长扩展, 并应用 MFI(Multi-Frequency Imaging) 技术。

2.1.2 毫米波的射电天线^[3]

除了用相位参照技术测定射电源位置 (精度为 0.1 mas) 以外^[25], 毫米波天线主要用于天体物理的研究, 在此也略作介绍。为了避免水分子的阻碍, 一般观测台站都选择在寒冷、少风和干燥之处, 如夏威夷的 Mauna Kea、智利的 Atacama desert 的 Chajnantor、南极的 Antarctic Plateau。除了一些已有和批准建造的单面镜, 如 IRAM(30 m , 欧洲)^[3]、JCMT(15 m James Clerk Maxwell Telescope, 英、荷、加)^[26]、FCRAO(Five College Radio Astronomy Observatory, 14 m , 美国)^[27]、SPST(South Pole Submillimeter Telescope, 美国, 正在研制中)^[28]、Nobeyama Submillimeter Telescope (45 m , 日本)^[3]、LMT(Large Millimeter Telescope, 50 m , 美国和墨西哥合作)^[29] 等, 也有采用多个天线和干涉技术的, 如表 2 所列。

表 2 地面毫米波和亚毫米波干涉望远镜

计划	国家	波段	孔径 /m	角分辨率 /(")	参考文献
ALMA	美、加、欧、日	毫米波	64×12	$0.003\lambda/0.3 \text{ mm}$	[30]
BIMA	美国	毫米波	10×6	$0.2\lambda/1\text{mm}$	[31]
IRAM	欧洲	毫米波	5×15	$0.6\lambda/3\text{mm}$	[32]
NMA	日本	毫米波	6×10	$1.5\lambda/3\text{mm}$	[33]
OVRO	美国	毫米波	6×10.4	$0.5\lambda/1.5\text{mm}$	[34]
SMA	美国、中国台湾	亚毫米波	8×6	$0.1\lambda/0.3\text{mm}$	[35]
CARMA	美国	毫米波	$25\times (2.5\sim 10)$	$0.1\lambda/1\text{mm}$	[36]

注: 上述仪器的全称分别为: ALMA(Atacama Large Millimeter Array)、BIMA(Berkeley-Illinois-Maryland Association)、IRAM(Institute de Radio Astronomie Millimetrique)、NMA(Nobeyama Millimeter Array)、OVRO(Owens Valley Radio Observatory)、SMA(Submillimeter Array)、CARMA(Combined Array for Research in Millimeter-Wave Astronomy)

其中 ALMA 和 CARMA 的具体情况介绍如下。

2.1.2.1 ALMA [30]

ALMA 是美国、加拿大、欧洲和日本的合作项目。由 64 架直径 12 m 天线组成, 天线是可移动的, 最大和最小的阵分别为 14 km 和 150 m, 接收器频带为 30~950 GHz, 相关处理机的运行速度为 1.6×10^{16} 次/s。整架仪器安放在全球最干燥和最高的台址之一的智利北部 Atacama 沙漠。2007 年一些天线开始运行, 但是整个项目将在 2011 年完成, 是继 VLT/VLTI 后 2000~2010 年间全球最大两个项目之一(另一项目为 Next Generation Space Telescope)。与 VLBA 相似, 运用相位参照技术, 分辨率可达 $0.01''$, 可使人们获得前所未有的系列天文现象的精细图像和精确位置 (0.1 mas)。其科学目标为: 1) 观测最早的远距星系, 即宇宙的第一缕曙光; 检测 CO 或 CII 的光谱线。2) 观测恒星形成的尘埃遮掩区, 以便研究 150 pc 处年轻的类太阳恒星周围的原恒星和原行星盘, 了解它们的物理、化学和磁场结构, 以及检测正在形成行星的潮汐空隙。3) 获取 $0.1''$ 角分辨率的天体像, 其研究的对象范围是从太阳系中的彗星和柯依伯带, 一直到邻近恒星形成区中行星形成盘、遥远星系中的星际介质结构。

2.1.2.2 CARMA [36]

CARMA 是由美国 OVRO 的 6 架 10.4 m 天线和 BIMA 的 25 架直径 2.5~10 m 天线组成的, 它将放置在美国加州东部海拔 2 438 m 地区。接收面积增加 50%~100%, 观测目标有近距星暴星系、蓝矮星系、近距分子云等。

除此以外, 还有正在建造的 3 架 20 m 的 KVN(Korean VLBI Network) 毫米波 VLBI 天线, 工作波段为 2.8, 22, 43, 86, 100 和 150 GHz [37]。

2.2 地面的光干涉(可见光和红外) [38,39]

目前我国的光干涉研究仍然处于实验室阶段, 本节仅对国外光干涉研究作详细介绍。

2.2.1 Keck [40]

Keck 是 JPL 和 CARA(California Association for Research in Astronomy) 的合作项目。它是一架在可见光和近红外观测的二元干涉仪, 由 2 台口径 10 m 的望远镜组成, 基线长度为 85 m。为了改进成像的能力, NASA 打算在望远镜的周围增加 4 个口径为 1.8 m 小望远镜, 以得到综合的星像。该仪器用于地外行星的探测, 具有检测离恒星 60 光年处像天王星样大小的行星能力, 也能检测近距恒星周围尘埃的总量和结构, 以便了解地外行星的形成, 为发射空间卫星 TPF (Terrestrial Planet Finder) 提供信息。

2.2.2 VLTI/PRIMA [41-43]

PRIMA(Phase-Referenced Imaging and Micro-arcsecond Astrometry) 是 VLTI(Very Large Telescope Interferometer) 的一套设备。众所周知, VLTI 是 ESO VLT 计划的一部分, 它是由 4 架 8.2 m 望远镜和 4 台移动的辅助望远镜(AT), 以及 6 条双束延迟线组成的一个望远镜阵。2004 年安装了第 1 台 AT, 第 2-4 台 AT 也已在 2005-2006 年安装。工作波段为红外 $1.2 \sim 20 \mu\text{m}$, 整架仪器安放在智利北部的 Cerro Paranal。它在联合干涉模式下工作。3 个干涉仪: VINCI(VLTI Interferometer Commissioning Instrument)、MIDI(MID-Infrared interferometric instrument)、AMBER(Astronomical Multiple BEam Recombiner) 已工作, GENIE(Ground-based European Nulling Interferometer Experiment) 正在研制, 第 5 个干涉仪 PRIMA 正在研讨之中。利用 VLTI 可在可见光和近红外进行高分辨率(mas 量级)以及高灵敏度的成像和光谱观测。

PRIMA 由两个 VLT 的 1.8 m 辅助望远镜组成, 将在 2007 年运行。其优点为: 1) 使

VLT 提高灵敏度, 能观测到 19 mag 的天体; 2) 它在观测暗天体时比 AMBER 的相位闭合技术 (phase-closure) 具有更高的分辨率; 3) 可运用相位参照技术进行相对天体测量, 精度可达到 $10 \mu\text{as}$ 。该仪器可以在成像和天体测量两个模式下运行, 成像模式可用于探测 AGN 的宽线区、分解银河系中心的星团、研究近距星形成区星周环境。当运行天体测量模式时, 在 200 m 基线上运用相位参照技术 30 min 积分时间观测可分离 $10''$ 的两颗星, 其相对天体测量的精度一般为 $50 \mu\text{as}$, 最佳可能达到 $10 \mu\text{as}$ 。可用于观测以下天体: 1) 地外行星和棕矮星。可进行近距星周围的地外行星 (240 pc 处木星大小的行星) 和小质量的伴星的检测, 测定其轨道参数及质量。搜索的目标星通常选择主序 M 型星 (亮于 12 mag)、已有视向速度值的主序晚型星和巨星。2) 双星。决定双星轨道和质量, 以研究恒星系统的形成和演化。3) 球状星团。从球状星团可以了解弛豫、质量层化、核心坍缩和潮汐效应的力学过程。以往资料局限于视向速度, 如果加入天体测量资料后, 内部运动提高至 $10 \mu\text{as/a}$, 由此可显著改进对球状星团内部力学过程的了解。4) 银心。银心星团中恒星的视向速度和自行能给出银心 0.1 pc 范围内的力学情况, 这对银心处巨大黑洞的存在和演化的研究是重要的论据。用 PRIMA 可以得到 10 kpc 处相对误差为 10% 的三角视差, 如果选择近距的类星体, 则可得到其绝对视差。

2.2.3 CHARA^[44]

这是美国 Georgia 大学的科研项目, 全称 Center for High Angular Resolution Astronomy。由 6 个 1 m 口径的望远镜组成, 排列呈 L 形, 最大基线长度为 350 m, 分辨率为 $200 \mu\text{as}$, 可以在可见光和近红外观测, 安放在威尔逊山。仪器主要用于恒星物理, 如测量恒星的直径、距离、质量、亮度和表面的黑子、耀斑以及地外行星的检测等。

2.2.4 Mark III 恒星干涉仪^[45]

该仪器是 MIT 的电子研究实验室 (RLE)、SAO、USNO 和 NRL 的合作项目。它的发展分三个阶段。1979 年 Mark I 第一次检测到恒星的干涉条纹和相位相干条纹的跟踪; 1982—1984 年研制成功 Mark II; 1986 年至今, Mark III 安放在威尔逊山进行常规的观测。它是口径 25 cm 的三元干涉仪, 排列呈 T 形, 南北方向基线长 12 m, 东北方向基线长 8.5 m。在东边增加了南北方向排列的 12 个固定的基墩, 可以安放 20 cm 的定天镜, 使排列呈 H 形, 构成 3~32 m 范围内的 36 条不同长度的南北基线。其科学目标为恒星位置的测定、恒星直径、双星和聚星的观测。

2.2.5 NPOI^[46,47]

该仪器全称为 Navy Prototype Optical Interferometer, 是美国海军天文台 (USNO)、海军研究实验室 (NRL) 和 Lowell 天文台的合作项目。1987 年开始设计, 1992 年 9 月在 Arizona 东南的 Anderson Mesa 的 Lowell 天文台开始筹建。天体测量阵是 35 cm 口径的四元干涉仪, 排列呈 Y 形, 每条臂长 250 m, 基线长度为 18~38 m。大视场天体测量精度为 2 mas。观测亮于 9 mag 的星, 计划观测 1 000 颗 FK 5 和射电星, 用于依巴谷参考架的维持; 测定只有 $200 \mu\text{as}$ 大小的恒星直径 (精度为 1%); 测定角距离为 $65 \mu\text{as} (\Delta m = 0 \text{ mag})$ 和 $200 \mu\text{as} (\Delta m = 3 \sim 4 \text{ mag})$ 的双星。成像的阵是口径为 12 cm 的六元干涉仪, 排列呈 Y 形, 基线长度为 20~437 m。可以观测近距晚型星的圆面, 1996 年 5 月和 6 月第一次得到大熊座 ξ 的像。

2.2.6 LBT^[48]

LBT (Large Binocular Telescope) 是意大利天文联合会 (以国家天体物理研究所为代表)、美

国阿利桑那(包括阿利桑那大学、阿利桑那州立大学、北阿利桑大学)、德国 LBT 组(包括海德堡 Max-Planck 天文研究所、Munich 的 Max-Planck 地外物理研究所、波茨坦天体物理研究所)以及个别的研究所(如 Ohio 州立大学、Tucson 研究公司、Notre Dame 大学等)之间的合作项目。两个直径 8.4 m 的主镜安放在同一个地平式的机架上,两个镜面中心相距 14.4 m,其收集光的面积等效于 11.8 m 望远镜,相干像的分辨率与口径 22.65 m 的望远镜相同,在可见光和近红外的分辨率分别为 5、22 mas,望远镜安放在亚利桑那东南 Safford 的 Mt Graham 国际天文台。该仪器的特点是:基线短、光路对称;两个望远镜在同一机架上,不需几何延迟线。在准备 TPF(Terrestrial Planet Finder)和 Darwin 发射中该望远镜用于寻找和测量候选恒星系统的黄道光以及搜索年轻木星似的地外行星。

除此以外,还有 COAST(Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope)^[49]、GI2T^[39](Grand Interferometer 2 Telescope)、IOTA(Infrared-Optical Telescope Array)^[50]、ISI(Infrared Spatical heterodyne Interferometer)^[51]、SUSI(Sydney University Stellar Interferometer)^[52]等光学/红外干涉仪。

3 干涉技术在空间天体测量中的应用

1967 年在加拿大 VLBI 第一次 VLBI 实验成功,继后,美国 VLBI 也获得成功。1986 年第一颗空间 VLBI 实验 TDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System)在 2.3 GHz 和 1988 年在 15 GHz 获得成功,以后提出了许多空间 VLBI 计划,如 QUASAT、RadioAstron、IVS 等,然而 HALACA(Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy)是第一颗用于实施空间 VLBI 的卫星^[53]。

3.1 空间的射电干涉技术

3.1.1 VOSP^[54,55]

VSOP(VLBI Space Observatory Programme)是第一个已经实施的空间 VLBI 计划,也是众多国家参与的国际合作项目,其科学目的是了解宇宙中强致密射电源的物理特征。虽然它不是专门为天体测量而设计的卫星,但是其对类星体观测的分辨率可达到亚毫角秒。日本 ISAS(Institute of Space and Astronautical Science)于 1997 年 2 月 12 日发射了 HALACA 卫星,其寿命为 5 年。由于姿态失控,最后一次观测在 2003 年 10 月,卫星在 2005 年 11 月 30 日停止运行。卫星轨道的远地点、近地点、倾角和周期分别为 21 400 km、560 km、31.3°和 6.3 h,由于地球扁率引起卫星自转轴对卫星至太阳的方向的进动,近地点和升交点的进动周期分别为 1 年和 1.6 年。该卫星携带了口径 8 m 的射电天线,工作在 3 个厘米波段:1.60~1.73 GHz、4.7~5.0 GHz 和 22.0~22.3 GHz,科学观测在波段 1.6 GHz(18 cm)和 5 GHz(6 cm)进行,工作时的天线温度为 75 K 和 95 K。卫星的 5 个地面跟踪站是日本 ISAS 的 Usuda、美国 NRAO 的 Green Bank、美国 Goldstone、西班牙 Robledo 和澳大利亚 Tidbinbilla(后面 3 个是美国 NASA/JPL 的 3 个深空跟踪站)。根据参加的 VLBI 地面台站的不同情况,VSOP 有 3 种记录格式: S2、VSOPT 和 VLBA/MKIV。10 个 VOSP 观测记录格式在日本 Mitaka 作相关处理;10 个 VLBA 记录格式在美国 Socorro 作相关处理;6 个 S2 记录格式在加拿大 Penticton 作相关处理,也可以在 Mitaka 作格式转换。14 个国

家的 25 架射电望远镜, 如 VLBA、EVN、APT(Asia-Pacific Telescope) 等参加了 VSOP 观测, 基线长度达 30 000 km。

1997 年 3 月 24 日进行了第一次天文观测, 观测 OH 脉泽源 W 49N。继而 5 月 7 日和 5 月 13 日在 1.6 GHz 观测类星体 PKS 1519-273 和 PKS 1504-166, 并且于 2000 年 1 月召开了“Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI”的讨论会。VSOP 的重要科学计划包括以下几个方面: 蝎虎 BL 类星体的研究、天体高亮度温度在 1 天以内的快速变化、AGN(3C273、3C279、3C345 等) 喷流现象的研究、重要源(如 NGC 4258, Centaurus A 和 Virgo A 等) 的观测、脉泽和巨脉泽的观测。详细结果参阅参考文献 [54]。

3.1.2 ARISE^[56,57]

ARISE(Advanced Radio Interferometry between Space and Earth) 是 2000—2020 年 NASA 的“Structure and Evolution of the Universe Roadmap”计划中发射的天文台之一。表 3 给出了 ARISE 与 VSOP 的基本参数, 以便比较。

表 3 ARISE 的基本参数

		VSOP	ARISE
卫星参数	发射日期	1997 年 2 月 12 日	2008 年
	寿命 /a	3	5
	近地点距离 /km	600	5 000
	远地点距离 /km	21 500	约 40 000
观测参数	天线直径 /m	8	25
	天线类型	Mesh	Inftatable
	资料传递速率	128 Mbit/s	1~8 Gbit/s
	偏振	Left Circular	Dual
	观测频带 /GHz	1.6, 4.9, 22	4.9, 22, 43, 60, 86
	系统温度 /K	100~200	8~40

从表 3 可知, ARISE 可以在高频 43、60、86 GHz 处观测。在 86 GHz 处检测条纹的阈值小于 10 mJy。在 86、43 GHz 处的分辨率分别为 15、30 μ as, 它比地面天线阵的分辨率高 5 倍。其科学目的为: 与蝎虎 BL 类星体 γ 线辐射变化大小相似, 可以观测其的双偏振像; 观测河外星系的水巨脉泽, 以决定黑洞中央 0.1'' 内分子的物理特征和运动; 单天线观测分子云中的 O₂, 以便得到星形成区的温度分布和化学成分; 观测引力透镜源的像, 以估计哈勃常数和透镜体的暗物质和亮物质的分布; 观测射电源喷流的像, 以便试验各种宇宙学和射电源演化的理论。现在此建议已修改为下一代空间 VLBI 的 iARISE 计划, “i” 表示 international, 把 1 个 25 m 的天线改为 2 个 15 m 天线。远地点距离为 900 000 km, 具有很好的 UV 覆盖, 能够得到特大质量黑洞和天体的微角秒的像^[58]。如果在地球轨道或近 Langrangian 点有 6 个望远镜的阵, 这样既具有高分辨的像, 天体测量精度又可提高 10 倍。

3.1.3 RadioAstro^[59]

RadioAstro 是俄罗斯科学院 Lebedev 物理研究所的天文空间中心及有关研究所和国家空间局与 20 个国家的合作项目, 卫星将于 2007 年底发射。卫星将携带 10 m 的射电望远镜在绕地球的椭圆轨道上运行, 半长轴为 189 000 km, 近地点距离在 10 000~70 000 km、远

地点距离在 310 000~390 000 km 之间变化。卫星绕地球旋转的周期为 9.5 d, 寿命为 5 a, 但是可能延长至 10 a。卫星定轨在发射中心 (ballistic center) 进行, 由 2 个控制中心和 3 个跟踪站的测距和测速资料归算后, 定轨的位置和速度精度分别为 100~300 m 和 2 mm/s。观测频率为 0.324、1.66、4.83 及 18.4~25.1 GHz。在最短的波长 1.35 cm 处的定位精度为 $8 \mu\text{as}$ 。记录格式有两种: 加拿大 S2 和 NRAO VLBA 格式。卫星的控制中心为乌克兰克里米亚的 Evpatoria 和俄罗斯莫斯科附近的 Bear Lake, 地面的跟踪中心有: 俄罗斯 Puschino、澳大利亚 Tidbinbilla 和美国 Green Bank。其科学目的为: 通过在核发射区宇宙线加速的大小、速度和形状, 发射线的光谱、偏振和变化, 了解巨质量黑洞附近 AGN 中央发射区的机制和物理过程; 用 AGN 的参数和观测的引力透镜研究宇宙模型、暗物质和暗能量; 研究脉泽和巨脉泽的射电发射机制, 以便了解银河系和 AGN 恒星和行星形成区的结构和力学; 借助于 VLBI 以及可见的闪烁 (visibility scintillations)、自行和视差的测定值了解银河系中子星和黑洞的结构和力学机制; 利用脉冲星的条纹闪烁观测结果, 了解星际和行星际等离子体的结构和分布, 研究运动和力学参考架的联系; 建立高精度的 ICRF; 建立高精度的地球重力场模型。

尽管 VSOP 和 RadioAstro 所携带的射电望远镜的口径大小差不多, 但是后者的飞行高度比前者高 20~100 多倍, 它可以与地面 16 个大口径的望远镜, 如 Arecibo 305 m、Bonn 100 m、GBT 100 m、GMRT 240 m、VLA 130 m、WSRT 90 m (Westerbork Synthesis Radio Telescope) 等, 进行 VLBI 观测, 使基线长度增加, 从而提高角分辨率。另外, RadioAstro 的特点是在 K 波段 (18.4~25.1 GHz) 可以实现多频率的综合, 以便在短时间内得到连续谱射电源的高质量图像, 从而能与 ELVA 在 K 波段得到的结果相比较。

3.1.4 VSOP-2^[60,61]

1997 年 3 月 VSOP-1 检测到干涉条纹后, 5 月 ISAS 成立了下一代空间 VLBI 小组, 2005 年 9 月底向 ISAS 提出了第 2 代空间 VLBI 计划, VSOP-2, 预计在 2011 年 4 月—2012 年 3 月间发射。卫星在椭圆轨道上运行, 近地点和远地点距离分别为 1 000 和 25 000 km, 周期为 7.5 h。VSOP-2 采用 9 m 抛物面天线, 观测波段为 8、22 和 43 GHz。角分辨率比 VSOP-1 提高 10 倍, 在 43 GHz (7 mm) 处角分辨率为 $40 \mu\text{as}$ 。其仪器设计有 4 个特点: 主反射器的面采用网状 (mesh) 结构, 以便减轻天线的重量, 从而减小由于太阳辐射压和残余大气阻力引起的角动量力矩; 50 cm 的通讯天线采用 10 Gb/s 的高速 A/D 转换器和多路信号分离器作为数字转换; 在精密的射电天体测量中运用相位参照技术作观测; 定轨精度可达 2 cm。相位参照技术要求各波段的定轨精度为约 120 cm (5 GHz)、50 cm (8 GHz)、6.5 cm (22 GHz)、1.8 cm (43 GHz), 但如果要检测 AGN 中 H_2O 脉泽的自行, 则要求须达到 2 cm 的定轨精度。JPL 用 GPS 接收机和稳定性 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ 的 3 维加速计模拟 VSOP-2 的定轨精度已达到 2 cm。

VSOP-2 的科学目的: 与下一代 X 射线与 γ 射线卫星相结合研究 X 射线源与 γ 射线源的发射机制; 观测 AGN 中心区磁场指向的偏振、喷流形成和演化以及法拉第旋转; 研究近距 AGN 的喷流和等离子体环面的形成, 以及吸积盘和特大质量黑洞的周围情况; 脉泽和巨脉泽的谱线研究; 年轻星的喷流和磁场的观测。

尽管以上描述了空间厘米波的情况, 但是为了证明超巨黑洞的存在, 要求用亚毫米或者空间 VLBI 直接观测在 Kerr 矩阵中的像。正在进行的 X 射线干涉仪, 已在实验室中检测到干

涉条纹,但是发射 X 射线干涉仪还需几十年时间。用 4 m 天线与 ALMA 结合,相应于一对 20 m 的天线。假如卫星在远地点(距离 30 000 km)处,它们的联合观测将提高角分辨率至 $5 \mu\text{as}$ (230 GHz 处)和 $3 \mu\text{as}$ (345 GHz 处),可以观测广义相对论的天体物理现象。SKA 是米至厘米波的射电望远镜,虽然由于星际散射,一个空间望远镜与 SKA 结合在 1 GHz 以下频带处不能提高角分辨率,但是联合观测将改进 SKA 在高频处的灵敏度。

3.2 空间的光干涉

3.2.1 HST/FGS^[62,63]

1990 年 4 月 24 日美国发现号航天飞机携带 NASA 和 ESA 联合研制的哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope 简称 HST) 飞入太空。它将工作至 2010 年,然后,整架仪器返回地球。HST 虽然不是一颗天体测量卫星,但其望远镜包括 RC 光学系统口径 2.4 m 的主镜,在焦平面上安放内半径为 $11'$ 和外半径为 $14'$ 的 3 个 90° 扇形块的精密导星传感器(Fine Guidance Sensors 简称 FGS),主要用于卫星的指向和天体测量的观测。另外,它还有大视场的行星照相机(Wide field and Planetary Camera 简称 WFPC) 和 4 个轴向仪器:暗天体照相机(FOC)、暗天体光谱仪(FOS)、用于紫外观测的哥达德高分辨率光谱仪(GHRS)和快速测光仪(HSP)。来自 FGS 的光线通过两个 Koester 棱镜,产生干涉信号,并由放置在棱镜后的光电倍增管接收光信号。条纹扫描用于观测双星,条纹跟踪主要用于恒星视差和位置的测定。HST 能观测比地面观测极限暗五十分之一的天体,其清晰度比其好 10 倍,从而把宇宙探索空间扩大了 850 倍,使人类光学观测的视野能够触及到距离地球 140 亿光年的天体。HST/FGS 已在依巴谷参考架与 ICRF 的联系、双星和变星的观测、近距小质量大自行恒星以及星团研究上做了不少工作。

3.2.2 SIM PlanetQuest^[64]

21 世纪 NASA 将启动 Origin Program,即用新的望远镜研究宇宙形成、星系和行星的起源,探索太阳系以外生命的存在。经过许多方案的选择,SIM PlanetQuest(原名 SIM) 已成为唯一得到 NASA 投资的在 Origin Program 中采用的望远镜。SIM 是美国喷气推进实验室(JPL) 提出的空间干涉仪,卫星高度 950 km,周期 103 min,发射时间一再延迟,已从 2004 年延至 2011 年发射,运行 5 a。卫星上 7 台望远镜排列在一条 10 m 基线上,组成三个独立的干涉仪进行观测,在光学波段(0.4~10 nm) 观测 20 000 颗恒星。在大视场测量时,测量位置的精度为 $4 \mu\text{as}$,而在小视场中测量位置的精度为 $1 \mu\text{as}$,对点源观测 1 h 可至 25 mag,分辨率为 10 mas,比 HST 好 4 倍。可以观测 25 kpc 范围内的各种天体,可用于太阳系外行星、宇宙距离尺度、黑洞和星际暗物质的检测等,也能得到 1 300 颗近距天体(大部分是红巨星和 100 颗河外天体)组成的参考架^[65]。

3.2.3 TPF-I^[66]

2001 年美国天文学和天体物理学十年回顾的文章《(Astronomy and Astrophysics in the New Millennium)》中提及在 21 世纪最重要的科学进展之一是在另一个行星上发现生命。TPF(Terrestrial Planet Finder) 的使命就与此有关。2004 年 5 月 NASA 宣布 TPF 将由两个空间天文台组成:2014 年发射可见光的日冕仪和 2020 年发射红外的长基线干涉仪。TPF 的科学目的:测量太阳系外地球大小行星的大小、温度、位置;从 TPF 光谱仪可得到天体上二氧化碳、水汽、臭氧和甲烷的含量情况,从而可研究该天体上是否有生命存在;TPF 不仅能检测和研究遥远的地外行星,而且能得到其所绕近距恒星的天体物理信息。

4 用干涉技术的天体测量课题

射电干涉技术的方法可以用于大视场和小视场的观测,光干涉主要用于小视场天体测量,除了用射电干涉仪实测岁差和章动以外,以下简述用干涉技术的各种天体测量课题。

4.1 河外参考架的建立与维护^[67-77]

已经用 VLBI 方法建立了准惯性的参考架。1997 年 23 届国际天文学联合会 (IAU) 大会通过了国际天球参考架 (基于 S/X 波段),并在 1998 年 1 月 1 日采用。ICRF 包括全天 608 颗射电源的位置:其中 212 颗射电源为定义源,294 颗射电源为候选源,102 颗射电源为其他源。1990 年以后,源的位置精度和参考架的稳定性有很大提高,坐标精度平均为 ± 0.25 mas,参考架的指向稳定在 ± 0.014 mas 以内。至 2004 年射电源增加了 168 颗,ICRF 源总共有 776 颗源分布全天,每 $8^\circ \times 8^\circ$ 有 1 个源。

提高 ICRF 位置精度包括 4 个方面的内容:1) 加入源的结构指数改正值,已给出 557 颗源的结构指数。2) 开展对 ICRF 源的高频观测,以减小源结构对天体测量精度的影响。通过 bi-monthly Research & Development of the VLBA (RDV) 计划,K 和 Q 波段源的像已在美国海军天文台的网页中给出。尽管现在 NASA 深空网中有 4 个天线安装了 Ka 波段,至 2007 年可能有 7 架天线,几年内可以增加至 18 架,但是从 1978 年开始应用的 S/X 波段转换至 X/Ka 波段需要 5~10 年重叠的时段,所以,至 2017 年才能全部采用高频观测。3) 改进对流层的模型和短期波动。4) 计入盘星和晕族大质量致密天体引力透镜对源位置和自行的影响,它们分别约为 $10 \mu\text{as}$ 和 $7 \mu\text{as/a}$ 。

射电源的加密采用 VLBA 实施的校准源巡天 (VLBA Calibrator Survey, VCS) 计划。从 1994 年 8 月起通过 VCS1-3 计划至 2004 年 5 月已找到 1968 颗新源,其中有 80% 的源可以提供相位参照技术使用。加入 ICRF 和 ICRF-Ext.2 后,约有 2291 颗可提供相位参照技术使用。通过 VCS1-3 计划后,在 $\delta > -45^\circ$ 天区,只有 5.3% 的天区在 4° 半径内找不到校准源。1998 年 e MERLIN 将测量赤道 -20° 以北 100 000 颗强度为 mJy 和精度为 mas 量级的源,VLA 也有类似的巡天计划,或者在 VLA 和 VLBA 的 MASIV (Micro-Arcsecond Scintillation-Induced Variability) 巡天中寻找致密的射电源,2006—2012 年将观测 10 000 颗源,以便对 ICRF 加密。今后 SIM PlanetQuest 和 Gaia 都将给出光学参考架,SIM 参考架将由 1 300 颗近距天体组成,它是非准惯性的,所以只有 Gaia 与 VLBI 所给出的参考架才能参与竞争。

4.2 参考架的联系

ICRF 采用射电参考架,由于源的数目较少,在实用上都采用依巴谷光学参考架。只要将射电星和射电源的射电位置与 HST 观测射电源光学对应体相对于依巴谷星的位置进行比较,就是射电与光学参考架联系方法。MERLIN 和 VLA 一直在观测射电星的位置和自行。用脉冲星的观测结果也可以推算射电和力学参考架的关系。

4.3 距离的测定^[78-82]

VLBA、EVN、VERA、VLA 等都可以用相位参照技术测定银河系水、羟基等脉泽源相对于河外射电源的位置 (最大角距离在 5° 以内),精度达到 $0.2\sim 0.5$ mas,最高精度可达到 0.05 mas,已经测量到 100 多颗射电星的视差和自行,视差精度为 0.04 mas。以 2000 年 9 月

—2002年6月观测 IRAS 21008+4700 与参照源 ICRF 2100+468 以及 2001年1月—2002年5月观测 W3(OH) 与参照源 ICRF 02141+622 为例, 两例中用 VLBA 各观测 7 次, 前者水脉泽源 IRAS 21008+4700 的自行 V_{LSR} 为 -44.8 km/s, 相应周年视差为 0.18 mas, 由此推导距离为 5.26 kpc; 后者对水脉泽源 W3(OH) 中不同点得到 V_{LSR} 为 -46.7 km/s 和 -51.1 km/s, 相应周年视差为 0.49 mas 和 0.44 mas, 距离分别为 (2.05 ± 0.23) 和 (2.26 ± 0.09) kpc。Xu 等人 (2006) 测量英仙旋臂中 W3(OH) 恒星形成区的甲烷脉泽源, 由自行可得此旋臂的旋转曲线, 也可以观测旋臂以外的脉泽源, 以了解银河系的结构和运动。

HST 和地面光干涉都测定三角视差, 结果与依巴谷的视差值相符。最近 Pan 和 Soderblom 分别测定了昴星团的成员星的视差, 它们的结果与依巴谷视差不一致^[83,84]。Van Leeuwen 负责依巴谷资料的重新处理, 将有可能解释此矛盾^[85]。依巴谷卫星仅能测定 100 pc 以内天体的三角视差, 而用射电干涉方法则将可测定距离扩展至 10 kpc, 其测定精度为 0.01 mas。虽然 2015 年 Gaia 将会给出 1×10^8 颗星的视差, 精度平均值也与 0.01 mas 相当, 但是 Gaia 用光学方法不能观测被尘埃遮掩着的银道面的天体和银心、被星周物质遮掩的渐近巨星支天体, 所以寻找脉泽源面亮度方法开辟了测定三角视差的新纪元。总之, 在 Gaia 和 SIM 发射前, 直至 2015 年射电观测的绝对精度为 0.10 mas, 相对精度为 0.010 mas。天体测量的下一步飞跃是 ALMA 和 SKA 投入运行, 后者绝对和相对天体测量精度可达 0.010 mas。

4.4 相对论的检验^[86-88]

2004年4月20日发射的 GP-B(Gravity Probe B) 是 NASA 与 Stanford 大学的合作项目。GP-B 飞行在 643.7 km 高度的极轨道, 周期 32 h, 寿命 18 个月。其科学目的是检验爱因斯坦广义相对论两个预测: 参考架的拖曳 (frame dragging) 和测地效应。对于前者 Schiff 计算 643.7 km 高度处极轨道的陀螺的进动为 42 mas/a; 后者为陀螺的轨道平面进动 6600 mas/a。GP-B 是由 4 个陀螺仪、1 架望远镜对 1 颗星 (猎犬 RS 型双星 HR 8703) 进行观测, 用跟踪望远镜把陀螺仪安放在导星位置, 磁场测量仪记录相对于导星的变化。York 大学和 MIT 于 1997 年 1 月 16/17 日—2001 年 1 月 29 日, 历时 4.5 a 测量了 HR 8703 相对于相位参照源 3C 545.3 的 28 组观测, B 2250+194 和 B 2252+172 为天体测量校正源。根据 27 次位置测定数据, 推导了 11 个天体测量参数, 分别是 2 个位置、2 个自行、1 个视差、2 个加速项、4 个投影轨道参数。结果视差为 (10.54 ± 0.13) mas (依巴谷资料得到 (10.33 ± 0.76) mas), 自行需进动得到后才能决定, 精度将好于 0.15 mas/a, 加速项为 (0.06 ± 0.03) mas/a²。观测结果将在 2007 年 4 月公布^[79-81]。2002 年 9 月木星与 QSO J 0832+1835 相合, 从参数 $\delta = (c/c_{\text{grav}}) - 1 = -(0.02 \pm 0.19)$ 就可给出引力场的速度^[89]。

4.5 飞船的导航

早在 1972 年已经用较差 VLBI(Δ VLBI) 技术测定了海盗号和火星 9 号的位置。继后, 1973 年 10 月 20 日对 ALSEP14 (即 1971 年阿波罗 14 号在月面上放置的发射装置 Apollo Lunar Surface Experiments Package) 与类星体之间进行 Δ VLBI 的观测, 又用此技术测定了阿波罗 16 号月面车相对于登月舱的位置, 并测定了阿波罗 14、15、16 号无线发射器之间的相对位置。为了导航, 已给出 K 波段 (24 GHz)230 颗和 Q 波段 (43 GHz)108 颗源的位置^[90-93]。

1998 年 7 月 4 日, 日本发射了第一颗火星探测器 NOZOMI, 拟在 1998 年 9 月 24 日和 12 月 18 日借助地球和月球的推力使 NOZOMI 于 1999 年 10 月 11 日到达火星, 但是未获成功, 探测器只能继续绕日运行。4 年后, 2002 年 12 月和 2003 年 6 月 NOZOMI 再次接近地球,

借助地球推力于 2004 年初到达火星。为了决定 2003 年 6 月 19 日得到第 2 次推力之前的轨道, 2002 年 9 月后, 9 架日本 VLBI 天线和加拿大 Algonquin 46 m 天线参加进行了 VLBI 对 ICRF 源的较差观测, 以确定 NOZOMI 的位置, 其结果与测距和测速方法得到的相符。2003 年 12 月 9 日, 探测器与火星相距 1 000 km, 但是并没有进入绕火星轨道, 14 日后离开火星, 继续绕日运行 2 a。2003 年 5 月 9 日日本发射了至小行星 HAYABUSA 的飞船, 2003 年 9 月 1 日至 12 月 31 日期间在 ICRF 表中选择 24 颗类星体 (距 HAYABUSA 小于 5°) 作较差观测, 并与测距和测速的结果比较^[94]。

4.6 脉冲星^[95-99]

自 1967 年发现脉冲星以来, 脉冲星一直为人们所关注。Joe Taylor 和 Russel Hulse 因发现脉冲双星 PSR 1913+16 而获得 1993 年诺贝尔物理奖。在射电和光学波段研究脉冲星的位置及其变化, 目前已形成脉冲星天体测量学。研究脉冲星的自行和视差有 5 个方面的应用: 获得银河系电子密度模型, 以便校正现在采用的理论模型, 对不能得到较弱的近距脉冲星的三角视差, 可以由模型的色散量估计其距离; 了解超新星的坍缩过程和密近双星的演化, 也可以了解单颗毫秒脉冲星在形成过程中的独特性; 可以确认脉冲星产生的天区或星团和脉冲星-超新星遗迹 (SNR) 星协, 从脉冲星和 SNR 的角距和脉冲星的运动估计脉冲星和相伴 SNR 的年龄; 精确的距离与中子星表面的热辐射相结合是中子星状态方程中光球大小的约束; 用于力学与河外参考系的联系, 以及精确的守时。1998—2000 年在 20 cm (1400~1740 MHz) 波段 5~7 次用 VLBA 的参照技术测定 9 颗脉冲星 (流量 8 mJy) 的 5 个天体测量参数: J 2000 的位置、视差和自行, 其位置和自行的精度分别为 $100 \mu\text{as}$ 和 $400 \mu\text{as/a}$, 预期将会用 VLBA 观测 100 颗脉冲星。HST 也测量了高能量脉冲星 Geminga (J 0633+1746) 和射电宁静中子星 (J 185635-3754) 的视差。

许多脉冲星的辐射在 VLBA 的 5 GHz 波段很弱, 所以单天线的 GBT (Green Bank Telescope)、ALFA (Arecibo L-band Feed Array) 和 PMB (Parkes Multibeam) 在 1.4 GHz 也都有在银道面内脉冲星巡天计划, 预期用 ALFA 在 5 年内能发现 1 000 颗脉冲星。另外, 上述 Effelsberg 100 m 望远镜、俄罗斯 Kalyazin 64 m、法国 Nançay 射电望远镜, 以及未来的 SKA 等都有长期的脉冲星计时阵的计划 (Pulsar Timing Array, PTA), 以便开展毫秒脉冲星计时的的工作, 并期望在太阳系历表误差研究和引力波探测方面取得重大进展。

4.7 双星的观测

全天 50% 以上的恒星是双星, 因此双星的研究是恒星天文的重要内容。光干涉对双星的观测可以确定双星轨道参数, 将其与分光观测相结合就可以得到双星的物理参数, 为研究双星之间质量交换、双星的演化提供必要的天体测量参数。光干涉 Mark III 和 NPOI 以及 HST 都有长期的双星观测计划, 现在已能观测分离为 $65 \mu\text{as}$ ($\Delta m = 0 \text{ mag}$) 和 $200 \mu\text{as}$ ($\Delta m = 3\sim 4 \text{ mag}$) 的双星, 如剑鱼座 30 内核的分解, 主序星末端 20-20-20 聚星系统的观测等^[100,101]。地面光干涉与 HST/FSG 都有太阳系外行星的探测计划, 主要是观测 M 型矮星, 如比邻星 (光谱型 $M_5\text{Ve}$, 质量 $0.11 M_\odot$)、巴纳德星 (光谱型 $M_4\text{Ve}$, 质量 $0.16 M_\odot$) 等。EVN 和 NASA 的 DSN 天线结合也有观测近距 dMe 射电星的天体测量计划, 以便寻找质量小于木星的伴星^[102]。

5 结束语

1987 年 11 月上海天文台 25 m 天线投入运行, 1994 年近乌鲁木齐的南山 VLBI 站投入

工作, 标志射电干涉技术在我国成功地应用。1999 年 3 m 的流动天线安放在云南天文台。2006 年北京密云 50 m 和昆明 30 m 天线投入运行, 我国测地、天文和空间卫星跟踪的厘米波 VLBI 网成功建立。该网将与 VLBA、EVN 和 VERA 一样独立地或与国际的 VLBI 网联合进行观测和开展各项研究工作, 另外也参加 SKA 的国际合作。20 世纪 90 年代紫金山天文台德令哈站 13.7 m 的毫米波天线投入工作, 尽管我国至今没有建立毫米波阵的计划, 但是参加了 ALMA 的国际合作计划。

中国科学院在八五期间开展了重点项目“光学天文学中高空间分辨率应用和技术研究”为我国研制长基线光干涉仪打下了基础, “十一五”国家自然科学基金会重点项目“斐索型天文光学干涉望远镜的研究”也得以实施。然而光干涉技术在我国还处于实验室阶段, 与国际先进水平差距大, 甚至落后了 20 多年。为使我国光干涉技术能够迎头赶上, 今后还须独立研制更大的望远镜, 我国各天文单位须要考虑如何在短期内从技术上取得飞跃进步。

参考文献:

- [1] Kovalevsky J, Seidelmann P K. *Fundamental of Astrometry*, Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- [2] Labeyrie A. *A&A*, 1970, 6:85
- [3] McKee C F, Taylor J H. *Astronomy and Astrophysics in the New Millennium*, Washington D C: National Academies Press, 2001
- [4] http://www.atnf.csiro.au/mnrf/mnrf_outline.html, 2006
- [5] <http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in>, July 4, 2006
- [6] Dreher J W. *Perspectives on Radio Astronomy Technologies for Large Antenna Arrays*, Dwingeloo: Netherlands Foundation for Research in Astronomy, 2000
- [7] Davis J G, Anderson B, Morison I. *Nature*, 1980, 228: 64
- [8] Napier P J, Bagri D S, Clark B G, et al. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 52(5): 658
- [9] <http://www.evlbi.org>, March 13, 2006
- [10] Thompson A R, Clark R G, Wade M, et al. *ApJ*, 1980, 44: 151
- [11] Napier P J, Thompson A R, Ekers R D. *Proceedings of IEEE*, 1983, 71(11): 1295
- [12] Fomalont E, Reid M. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61: 658
- [13] <http://www.aoe.nrao.edu/evla>, August 11, 2006
- [14] Honma H, Kawaguchi N, Sasao T. *Radio Telescope, Proc. SPIE*, 2000, 4015: 624
- [15] Sawada-Satoh S. *Proceedings of the VSOP Symposium, Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI*, held in Japan, 2000
- [16] Honma M, Fujii T, Hirota T, et al. *APJS*, 2003, 55: 57
- [17] Horiuchi S, Murohy D W, Ishitsuka J K, et al. *Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA*. ASPC, 2005, 340: 572
- [18] Fey A L, Boboltz D A, Charlot P, et al. *Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA*, ASPC, 2005, 340: 514
- [19] Gabuzda D. Golden A. In: Romney J D, Reid M J eds. *Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA*. ASPC, 2005, 340: 566
- [20] Johnston K J, Boboltz D A, Fey A L, et al. *BASS*, 2005, 37(4): 1156
- [21] White R L, Becker R H, Helfand D J, et al. *ApJ*, 1997, 475: 479
- [22] Ivezić Z, Menou K, Knapp G R, et al. *AJ*, 2002, 124: 2364
- [23] Fomalont E, Reid M. *New Astronomy Reviews*, 2004, 48: 1473
- [24] <http://www.ska.telescope.org>, 2007
- [25] Fomalont E B. *Astrometry in the age of the next generation of large telescope*, ASPC, 2005, 338: 335
- [26] <http://www.jach.hawaii.edu/JCMT>, July 20, 2006

- [27] <http://cfa-www.harvard.edu/~aas/tenmeter/tenmeter.html> (FCRAO)
- [28] <http://cfa-www.harvard.edu/~ass/tenmeter>, September 1, 2002(SPST)
- [29] <http://www.lmtgtm.org>, 2006
- [30] <http://www.eso.org/projects/alma>, January 9, 2005
- [31] <http://bima.astro.umd.edu/> July 30, 2004
- [32] <http://iram.fr/>, June 6, 2006
- [33] <http://www.nro.nao.ac.jp/~nma/index-e.html>, July 8, 2006
- [34] <http://www.ovro.caltech.edu/>, 2006
- [35] <http://sma-www.harvard.edu/>, August 3, 2006
- [36] <http://www.mmarray.org> (CARMA), 2006
- [37] Minh Y C, Kin H G, Han S T, et al. IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2002-210002, 2004: 156
- [38] 金文敬, 李东明, 唐正宏, 等. 大地测量与天文地球动力学进展, 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002: 148–158
- [39] 王正明, 徐家岩, 肖金宏, 等. 天文光干涉测量, 北京: 科学出版社, 1996
- [40] <http://planetquest.jpl.nasa.gov/keck>, 2006
- [41] Quirrenbach A, Coude du Foresto V, Daigne G, et al. SPIE, 1998, 3350: 807
- [42] Launhardt R, Henning Th, Queloz D, et al. Astrometry in the age of the next generation of large telescope, ASPC, 2005, 338: 167
- [43] <http://obswww.unige.ch/Instruments/PRIMA/>, 2006
- [44] <http://www.chara.gsu.edu/CHARA>, January 11, 2006
- [45] Shao M, Colavita M M. *Annu Rev. Astron. Astrophys.* 1992, 30: 457
- [46] Armstrong J T, Mozurkewich D, Rickard L J, et al. *ApJ*, 1998, 496: 550
- [47] <http://ftp.nofs.navy.mil/projects/npoi>, 2006
- [48] Herbst T M, Hinz P M. *New Frontiers in Stellar Interferometry. Proc. SPIE*, 2004, 5491: 383
- [49] <http://www.mrao.cam.ac.uk/telescopes/coast>, 2006
- [50] <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/IOTA>, 2006
- [51] <http://isi.ssl.berkeley.edu>, 2006
- [52] <http://www.physics.usyd.edu.au/astron/susi>, 2006
- [53] Hirabayashi H, Hirose H, Kobayashi H, et al. *PASJ*, 2000, 52: 995
- [54] Hirabayashi H. *Proceedings of the VSOP Symposium, Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, held in Japan, 2000: 3*
- [55] Fomalont E, Hirabayashi H, Murata Y, et al. *Proceedings of the VSOP Symposium, Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, held in Japan, 2000: 167*
- [56] Ulvestad J S, Linfield R P. *IAU Colloquium 164, Zensus J A, Taylor G B, Wrobel J M, eds. Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources, ASPC, 1998, 144: 397*
- [57] Marscher A P. *Proceedings of the VSOP Symposium, Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, held in Japan, 2000: 261*
- [58] Murphy D, Preston R, Fomalont E, et al. *Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA, Romney J D, Reid M J, eds. ASPC, 2005, 340: 575*
- [59] <http://www.asc.rssi.ru/radioastron>, 2006
- [60] Hirabayashi H, Murata Y, Aski Y, et al. *Optical, Infrared and Millimeter Space Telescope, Proc. Mather J C, ed. SPIE, 2004, 5187: 1646*
- [61] Hirabayashi H, Murphy D W, Murata Y, et al. *Proceedings of the VSOP Symposium, Hirabayashi H, Edward P G, Murphy D W, eds. Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, held in Japan 2000: 277*
- [62] Kovalevsky J. *Modern Astrometry*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- [63] 李东明, 金文敬, 夏一飞, 等. 天体测量学方法——历史、现状和未来, 北京: 科技出版社, 2006
- [64] <http://sim.jpl.nasa.gov>, 2006
- [65] Fey A L, Ma C, Arias E F, et al. *AJ*, 2004, 127: 3587

- [66] <http://planetquest.jpl.nasa.gov/tpf>, 2006
- [67] Ma C Highlight of Astronomy, in press, 2006
- [68] Jacobs C S, Charlot P, Fomalont E B, et al. IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2002-210002, 2004: 75
- [69] Petrov L, Kovalev Y Y, Fomalont E B, et al. AJ, 2005, 129: 1163
- [70] Beasley A J, Gordon D, Peck A B, et al. ApJS, 2002, 141: 13
- [71] Fomalont E B, Petrov L, MacMillan D S, et al. AJ, 2003, 126: 2562
- [72] Fomalont E B. Astrometry in the age of the next generation of large telescope, ASPC, 2005, 338: 335
- [73] Bobltz D A, Fey A L, Charlot P, et al. IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2002-210002, 2004: 361
- [74] Jacobs C S, Lanyi G E, Naudet C J. IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2002-210002, 2004: 70
- [75] Gontier A M, Le Bail K, Feissel M, et al. A&A, 2001, 375: 661
- [76] Charlot P. IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2002-210002, 2004: 12
- [77] Fey A L, Ojha R, Jauncey D L. AJ, 2004, 127: 1791
- [78] Hachisuka K, Mochizuki N, Asaki Y, et al. Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA, ASPC, 2005, 340: 520
- [79] Xu Y, Reid M J, Zheng X W, et al. Science, 2006, 311: 54
- [80] Binney J J. Science, 2006, 311: 44
- [81] Reid M J, Readhead A C S, Vermeulen R C, et al. ApJ, 1999, 524: 816
- [82] Herrnstein J R, Moran J M, Greenhill L J, et al. Nature, 1999, 400: 539
- [83] Pan X, Shao M, Kulkarni S R, Nature, 2004, 427: 326
- [84] Soderblom D R, Nelan E, Benedict G F, et al. AJ, 2004, 129: 1616
- [85] van Leewen F, Fantino E. A&A, 2005, 439: 347
- [86] Lederman J I, Ronson R R, Bietenholz M F, et al. Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA, ASPC, 2005, 340: 526
- [87] Ransom R R, Bartel N, Bietenholz M F, et al. In: Romney J D, Reid M J, eds. Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA, ASPC, 2005, 340: 506
- [88] <http://einstein.stanford.edu> (GP-B), 2006
- [89] Fomalont E B, Kopeikin S M. ApJ, 2003, 598(1): 704
- [90] Michael W H, Jr, Cain D L, Fjeldbo G, et al. Icarus, 1972, 16: 57-73
- [91] Slade M A, MacDoran P F, Thomas J B. JPL Technical Report, 32-1526, Vol XIX, 1974: 31-35
- [92] Slade M A, Preston R A, Harris A W, et al. Deep Space Network Progress Report 33. Pasadena, California: JPL, 1976: 37-54
- [93] King R W, Counselman C C III, Shapiro II, et al. JGR, 1976, 81: 6251-6256
- [94] Ichikawa R, Dekido M, Ohsaki H, et al. In: Vandenberg N R, Baver K D eds. IVS 2004 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2002-210002, 2004: 253
- [95] Briken W, Benson J M, Goss W M, et al. ApJ, 2002, 571: 906
- [96] Cordes J M, Freire C C, Lorimer D R, et al. ApJ, 2006, 637: 446
- [97] Ransom S M, Stairs I H, Backer D C, et al. ApJ, 2004, 604: 328
- [98] Brisken W. Future Directions in High Resolution: The 10th Anniversary of the VLBA, ASPC, 2005, 340: 489
- [99] Taylor T H, Manchester R N, Lyne G. ApJS, 1993, 88: 529
- [100] Lattanzi M G, Hershey J L, Burg R, et al. ApJ, 1994, 427: L21-L24
- [101] Henry T J, Franz O G, Wasserman L H, et al. ApJ, 1999, 512: 864
- [102] Guirado J C, Ros E, Jones D L, et al. Proceedings of the 6th European VLBI Network Symposium, 2002

Interferometric Technique and its Application on Astrometry

JIN Wen-jing

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: The optical, infrared and radio interferometers, such as VLBI, VLA, SKA in centimeter band and ALMA, CARMA in millimeter band and VLTI/PRIMA, CHARA, Mark III, NPOI, LBTI in optical band, are introduced. The application of interferometric technique for space strometry, such as VOSP, ARISE, RadioAstro mission in radio band and HST/FGS, SIM in optical band, is presented. The research topics using interferometric technique in the field of astrometry are given as follows:

- 1) Establishment and maintenance of extragalactic radio reference frame. In order to improve the positional accuracies of radio sources the following work should be done: (1) In the VLBI data processing the influence of structure by using structure index should be estimated. Now the structure index of 557 radio sources are given; (2) The observations of radio sources in ICRF will be made in high frequency in order to reduce the influence of structure; (3) the theoretical tropospheric mode should be improved and the short-term tropospheric delay fluctuations will be considered; (4) the influence about $10 \mu\text{as}$ in position and $7 \mu\text{as/a}$ in proper motion due to the gravitational lensing induced by disk stars Massive Astrophysical Compact Halo Objects (MACHO) in our galaxy will be considered. The number of radio sources in ICRF should be increased through VCS and MASIV program.
- 2) Linkage between reference frames. The optical and radio interferometers such as MERLIN, VLA and HST are used for link of two reference frames. The linkage between radio and dynamical reference frame will be determined by observations for pulsars.
- 3) Determination of distance. The positions of H_2O and OH maser sources relative to positions of extragalactic radio sources are determined with the phase referencing technique in the observations of the VLBA, EVN, VERA, VLA. The accuracy of parallax determined by referencing technique of radio observations is 0.01 mas within 10 kpc which equals to that obtained from Gaia. So it has opened a new era of exploiting the enormous surface brightness of maser sources with radio interferometric astrometry. The trigonometric parallax will also be obtained from HST and ground optical interferometers.
- 4) Test of relativistic effects. The GP-B was lunched on April 20, 2004 for testing two predicted general relativistic effects: frame dragging and geodetic effect. The position of GB will be determined by observation of RS CVn binary HR 8703 while its relative position to radio sources with high accuracy will be determined by phase referencing technique.
- 5) Navigation of spacecraft. This technique was also used in the navigation of spacecraft in 1972 for determining the position of Mars 9 and radio emission machines on the points of Apollo 14, 15 and 16 located lunar surface. The precise positions of NOZOMI which is first Japanese Mars probe lunched on July 4, 1998 and of a spacecraft to asteroid HAYABUSA lunched on May 9,

2003 were determined by using this method.

6) Pulsar observations. Pulsar astrometry is formed as a branch of astrometry to study the character of pulsar in optical and radio band. The production rate of pulsars in Galaxy will be known from their proper motion and parallax and its origin can also be understood. The 5 astrometric parameters for 8 new pulsars were determined with the accuracies about $100\mu\text{as}$ and $400\mu\text{as/a}$ with VLBA during 1998—2000. Then 100 pulsars will be observed with VLBA. The survey of pulsar is implemented at many large antennas such as GBT, ALFA and PMB. The milli-second pulsar will be observed in long term for timing with radio telescope at Effelsberg, Kalyazin, Nancay, and SKA. In optical band the measurements of parallax were made by HST for Geminga, a high-energy pulsar and J 185635—3754, a radio quiet neutron star.

7) Binary. Over 50% of stars in the sky is binary. The orbital parameters of binary will be determined with optical interferometer. Combining the spectroscopic observations the physical parameters of binary will be obtained for studying the exchange of mass and the evolution of binary. The inner core of R136 cluster in the 30 Dor nebular and 13 low mass multiple systems were observed by HST. The program to observe the M dwarf such as Barnard's star and Proxima Centauri for search exoplanets will be implemented with HST/FSG and ground based optical interferometers.

Finally the present circumstance of developing the interferometric technique in China is briefly described. The VLBI network contains 4 antennas at Shanghai, Urumqi, Kunming and Beijing has been operated since 2006. The millimeter antenna with aperture of 13.7 m at Delingha has been operated by Purple Mountain Observatory since 1990s. Comparing with the advanced world level in the field of application of optical interferometric technique our level lags behind that more 20 years in time aspect. In the future we should attain and surpass this level in a short period for fabrication of a large optical telescope.

Key words: astrometry; interferometric technique; celestial reference frame; extraterrestrial planet; binary