

讲座

空间 VLBI

王强 张福俊

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文简要地论述了空间 VLBI 对于天体物理学研究的意义,对目前国际上正在进行的空间 VLBI 计划作了扼要的介绍。

一、绪 言

甚长基线干涉仪 (VLBI) 的出现对天文学和天体物理学的发展起了有力的推动作用^[1,2]。具备较其他观测手段至少高二个量级的空间分辨率是 VLBI 取得突出成就的主要因素。

目前的地面 VLBI 观测在许多情况下和很大程度上分解了类星体、活动星系核和银河系脉泽源等目标,但也发现不少射电源中有些致密成分,地面 VLBI 观测不能加以分解^[3-7]。研究表明,理论模型常常不能唯一地满足观测结果。为了进一步深入地作天体物理学研究,需要在更精细的尺度上描绘出射电源的射电图像^[8,9]。这只能通过进一步提高 VLBI 分辨率来实现。

提高 VLBI 分辨率的途径之一是提高观测频率,但这受到天线条件等技术限制和大气相位起伏的限制,而且射电各波段的观测都有其独立的意义。因此,提高分辨率的另一途径——继续延长基线,突破地面局限,建立 VLBI 空间站,便是 VLBI 发展的一种必然趋势,它将给天体物理学以新的推动力和深刻影响。

二、空间 VLBI 观测的意义

发射一个绕地球飞行的太空 VLBI 站,与地面 VLBI 站配合,可得到较地球直径长1—3倍的基线,从而能显著地提高分辨率。此外,利用太空 VLBI 站的快速绕行可实现快速成像,这对某些变化较快的目标的观测是有利的。

早在七十年代初,美苏等国的天文学家就提出了空间 VLBI 的设想,以后出现过不少方案,曾打算在太空站或航天飞机上安置大型天线。最终的计划则是决定在自由飞行的人造卫星上安置 VLBI 天线^[10]。

在绕地球运行的人造卫星上安置 VLBI 观测站,同地面 VLBI 站联测,便构成了初具规模的空间 VLBI。除了基线较长这个最基本特点外,空间 VLBI 还将具备以下特点:

1. 空间 VLBI 站在几小时内绕地球运行一周,故若有较理想的地面 VLBI 网配合,在较短时间(如几小时)内便可形成较具规模的 UV 覆盖,从而适于对变化较快的目标快速成像或

作较大样本的普查。

2. 由于卫星绕行周期与地球自转的周期有差别, 空间 VLBI 站的每次绕行得到的 UV 覆盖不同, 故若作较长时间(如 48 小时)观测, 可得到较密集和完整的 UV 覆盖, 从而适于作高灵敏度和高动态范围的观测。

3. 对于赤道附近的目标, 空间 VLBI 的 UV 覆盖不再是如同地面 VLBI UV 覆盖那样的东西线状走向, 从而能大大改善赤道附近射电源的成图质量。

4. 观测南天射电源时, 因受台站地理分布的限制, 地面 VLBI 网的 UV 覆盖不佳。空间 VLBI 将使这种状况有较大的改观。

空间 VLBI 将极大地有助于以下学术领域的研究:

1. 活动星系核和类星体

研究表明, 活动星系核和类星体有可能起源于统一的演化模式, 如 Seyfert 星系介于类星体和普通星系之间, BL Lac 型天体是核心喷流与视线夹角很小的一类星体; 也可能是由于不同的初始条件而产生的不同演化系列, 如两种类星体和 Seyfert 星系分别对应于旋涡星系和椭圆星系, BL Lac 型天体也总是在椭圆星系核中发现^[11-15]。但是, 很多问题, 如活动星系核和类星体中物质相对论性运动的起源、爆发的能源、吸积的方式以及分类与内部核心结构的关系等, 都有待于用更高分辨率的观测来帮助解决:

(1) 核心物质的形态与结构

中心是否存在巨黑洞? 吸积方式如何? 是否为吸积盘? 薄盘还是厚盘? 角动量如何? 这些问题都是引人入胜的未解之谜。光学宽线发射可能来自绕中心体转动的等离子体, 其线尺度约为 10^{16-18} cm, 它们的分布以及其与从核心中喷发出的物质作用, 可能与单边喷流现象、视超光速运动及时变性质等有关^[16-18]。有人认为相对论性激波可导致辐射。能否发现丝状结构对该理论是一种检验^[19]。

(2) 喷流与物质运动

当前, 对活动星系核和类星体中喷流的能源、过程和细节的了解还不够充分, 对许多观测现象, 如在不同尺度上喷流方向的变化、校直, 喷流形态的消散、弯曲及其与红移和中心流量的关系等也还不能唯一地解释^[16,19]。故必须更深入、细致地观测喷流的形态和运动, 如亮度分布, 结点的速度, 初始状态和方向性等, 从中探讨喷流和物质运动与中心能源的物理、几何关系以及视超光速现象的机制。

(3) 超高亮温度的检测

理论上认为辐射电子的自康普顿吸收将亮温度限制于 $\lesssim 10^{12}$ K, 而低频变源的观测显示了亮温度高达 10^{15} K 的可能性^[20], 多普勒运动增强效应以及相干辐射则是产生该现象的可能原因。高分辨率的观测将能给出判别的依据。

2. 天体脉泽

对银河系内的脉泽源已作了较细致的观测和研究, 但进一步提高分辨率仍是非常必要的:

(1) 河内脉泽

某些河内 H_2O 、OH 脉泽用地面 VLBI 不能分解^[21]。而它们的分解和成像, 对脉泽的内在尺度、形态、亮温度和机制的了解是必需的, 并有助于脉泽的精确定位和时变研究。对河内

H₂O 脉泽定位精度的提高还能改进自行测距的精度。

(2) 河外脉泽

河外的强 H₂O 脉泽源来自星系的中心, 其亮温度比河内脉泽高得多, 角尺度则要小得多, 地面 VLBI 对它完全不能分解^[22, 23]。提高分辨率可望将其分解或定出更低的角尺度下限。

3. 河内连续谱射电源

对许多河内射电源的结构、活动性质和机制等的探索还有待于进一步提高分辨率来实现。

(1) 射电活动星

从射电活动星耀斑爆发的流量和时变尺度导出的亮温度, 明显超过了自康普顿散射吸收导致的 10¹²K 限制。空间 VLBI 对此将能作出检证。空间 VLBI 的快速成像则能帮助区分射电爆发是在时间上还是在空间上变化^[24-26], 还可望分辨出射电双星, 以研究其运动、尺度等参数^[27], 并可用于探测中子星、黑洞星中的物质吸积以及粒子高速抛射等情况。

(2) 一些较大的河内射电源

某些活动性较强的河内射电源, 如 S5433、Cyg X-3、银河系核心等, 在形态、盘结构、物质吸积、喷流、进动、时变等方面, 有不少有趣和复杂的表现与活动星系核很类似。它们也许有相似的能源和机制^[28-30]。可望通过空间 VLBI 对这些河内射电源的结构及其变化作监测和研究。

三、实施中的空间 VLBI 计划

1. Quasat 计划

Quasat 计划最先由欧洲、美国和澳大利亚天文学家提出设想, 1983年—1985年由美国宇航局 (NASA) 和欧洲空间局 (ESA) 对其技术设备分别作了探讨和论证。1986年起由 ESA 负责从科研角度对 Quasat 作计划安排。如果顺利的话, 在 1995—1996 年间发射卫星。

(1) 轨道参数

Quasat 的轨道选择原则上是使 Quasat 与美国甚长基线阵 (VLBA) 和欧洲 VLBI 网 (EVN) 配合, 得到较为完整、合理的 UV 覆盖, 轨道参数曾定为: 近地点距离 ~5700km; 远地点距离 ~12500km; 倾角 $i=63^\circ.4$ 。但最近, 为了节省经费, 已打算将该卫星发射到同步传输轨道上。卫星将在两级轨道上工作, 开始的轨道远地点距离为 36000km, 大约 1—2 年后, 再进入最后的轨道, 其远地点距离为 22000km, 近地点均为 5000km, 倾角 ~30°, 在这两种轨道上, 卫星运行的周期分别为 12.2 小时和 7.75 小时^[31]。

Quasat 的开始轨道适于作较高分辨率的观测, 但成像的动态范围不高; 最后轨道则适于作高动态范围的观测, 而分辨率略低一点。

卫星运行的寿命为 2—5 年。

(2) 天线和接收系统

Quasat 的天线和接收系统由 NASA 和 ESA 分别研究^[32]。

NASA 的天线方案是一个由多根伞肋支撑的 15 米伞架盘, 相邻伞肋之间用三角形的反射薄膜连络, 发射时, 天线卷在一个盘中, 卫星进入轨道后, 伞肋从盘中卷出, 形成抛物形的

天线结构[图1(a)]。ESA的天线方案则是采用一个15—20米的充气膨胀盘,在进入轨道后用氮气充盈,随后,构成盘的物质起化学性质变化,从而硬化形成抛物面天线,盘的上部能透过电磁波,并有力学支撑作用,下部则由高强度的反射薄片构成[图1(b)]。

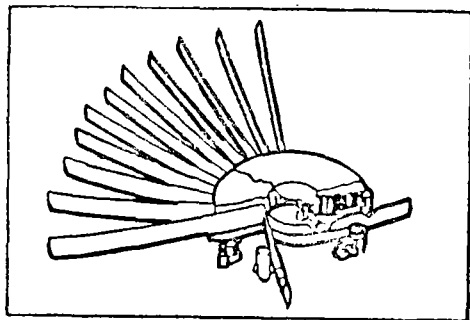


图1 (a) NASA的天线设计

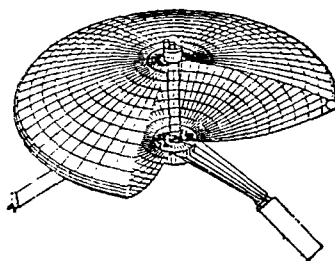


图1 (b) ESA的天线设计

馈源被置于主天线面的主焦点上,其设计可对左右旋偏振同时观测。

接收机用搅拌循环冷却的方法将温度保持在80K左右,它采用致冷低噪声 HEMT 放大器,分别用于1.35、6、18和92cm 波长的左右旋偏振,噪声温度在 20—100K 之间。

(3) 信号的传输和转换系统

每个偏振频道由本振和两个中频转换器送出两路中频信号,用矩阵转移器从这些中频信号中选出四路,再由视频转换到上、下边带,八个视频输出器各以 18Mbit/s 的速率作1bit 采样,其中1/9以 VLBA 格式记录起首部、同步、钟、奇偶性等信息,故它是由四个 16MHz 的频道构成总共为 64MHz 的带宽。若作频谱观测,可用2bit采样以提高信噪比。

中频范围为 500—1000MHz,同样范围的本振将其转换到视频。视频带宽可在8、4、2、1、0.5、0.25MHz 内选择。中频本振的步长为10KHz,以满足谱线观测时对频率分辨率的要求,并用以作条纹率的多普勒漂移的校正。

本振由地面跟踪站将氢钟标频发射给 Quasat 来提供,其稳定度不低于 10^{-14} ,相干时间可达300s。Quasat 的标频信号还要送回跟踪站,以便对Quasat的运动多普勒频移作修正,并求出Quasat 的位置和速度。Quasat 的标频与相位锁相器连接,以保持相位相干。

以144Mbits/s 采样的信号用八相转变键技术重新合成为两个 32MHz 的左、右旋偏振信号,各以 72Mbits/s 的速率向地面站发射传送。再由地面站用八相解码器重新变回bit 形式。ESA 则考虑了模拟传输方案,其不同处在于它将中频转换出来的信号相干地送入X波段,用两个偏振通道将它以模拟形式送回地面站,再以与 VLBA 兼容的方式作2bit记录,这可使灵敏度有所提高。

(4) 地面支持系统

Quasat 的正常工作需要地面跟踪站与之随时保持联系^[33]。这些联系包括: 1. 接收和记录科学数据; 2. 向 Quasat 传送氢钟标频; 3. 控制 Quasat 的观测程序; 4. 获取 Quasat 的工程数据。

标频的往返在 X 波段进行, 还要用 S 波段作下传频道, 以双频分析来校正电离层影响。

地面跟踪站所需设备有: 1. 氢钟; 2. X、S 波段发射机和接收机; 3. 比较上、下传送标频相位的设备; 4. 与 VLBA/MK 系统兼容的数码解调和记录设备。

卫星的控制操作指令并不要求地面站的完全覆盖, ESA 计划在 Kiruna 专建一个 S 波段的地面站用于卫星控制。NASA 则计划利用深空网在美国加利福尼亚、澳大利亚和西班牙的 34 米天线来控制卫星。数据信号的接收要求地面站对 Quasat 有完全的覆盖。用 NASA、ESA 的五个台站可覆盖 90% 的天区, 若在日本和南美再建两个接收站, 则覆盖率达 100%。

(5) 成图能力

Quasat 与 VLBA 等地面 VLBI 网联测的成图能力, 已通过模拟试验作了估计^[34]。对于北纬较高的目标, 48 小时的 UV 覆盖很好, 这时对相距 0.16mas、总流量 0.017Jy 的双源能清楚地加以分辨。对总流量 ≤ 1 Jy 的源, CLEAN 处理后, 图像的噪声强度在热噪声水平之下; 当总流量增加时, 噪声增加较慢。6—12 小时的 UV 覆盖也能作出一定质量的图, 但对纬度较低的目标, 至少需 24 小时才能得到较好的 UV 覆盖。若观测时间较长, 对南天目标也有较强的成图能力。但总的来讲, 由于地面站地理分布的关系, 成图能力随着目标纬度的南移而降低。用台站数 > 30 的全球网配合 Quasat, 可相对减少观测时间。对于复杂的目标, 全球网投入较仅以 VLBA 投入效果要明显的好。

Quasat 的分辨率, 以 1.35cm 为例, 可达 40—60 μ as, 若观测时间充分, 地面网理想, 则完备的 UV 覆盖能将分辨率提高一倍左右而导致超分辨率。

(6) 数据处理问题

Quasat 与地面站之间的相对速度和加速度较地面站之间的要大得多, 这对条纹率、延迟及频率的漂移有所影响。此外, 对于弱源, 灵敏度不宜以模拟成图来判别, 因信噪比的不足可使条纹检不出, 从而使信息完全丧失。对这些问题的考虑如下^[35]: (i) 每个视频带宽为 8MHz, 延迟的求取要求卫星的预知距离精度为 37.5 米, 这不太难做到; (ii) 条纹率很快, 但可用处理机中的 32-bits 的条纹旋转器来减慢; (iii) 对最大的延迟率, 也只需在 10^5 个 bits 中作一个 bit 的增减; (iv) 频率漂移, 在 1.35cm, 最大值约为 0.47GHz。这可用改变本振来作补偿; (v) 若要求出条纹率, 对它的预知范围必须小于 $(2T)^{-1}\text{Hz}$ (T 为数据积分时间 (s)), 这相当于要求预知相对速度误差不大于 $(\lambda/2)T^{-1}/\text{s}$ (λ 为波长); (vi) 整体拟合法 (globalfitting) 是检测弱源的较好办法, 但它必须在至少一条基线上检出条纹才能应用, 故 Quasat—Bonn 基线或 Quasat—VLA 基线能否检出条纹便是 Quasat 能否观测弱源的极限条件。以 1.35cm 波长, Quasat—Boon 基线为例, 数据积分时间取 100s, 相关流量为 0.05Jy 时, 信噪比 ~ 5 。

2. RADIOASTRON 计划

苏联也制定了称之为 RADIOASTRON 的空间 VLBI 计划, 打算在 1991 年发射一个携带 10 米直径天线的卫星, 卫星轨道的半长轴为 42000km, 半短轴为 26000km, 远地点为 75000km, 倾角 67° , 远拱点坐标为: $\alpha = 6^\circ, \delta = 23^\circ 27'$, 即为一个高偏心率的轨道, 因此, 该空间 VLBI 的基线很长, 而 UV 覆盖则较差些, 所以较适宜作动态范围不太高的高分辨率观测^[36]。

RADIOASTRON 能在 1.35, 6, 18 和 92cm 上作左右旋偏振的观测, 它的技术指标设想与 Quasat 计划的完全类似。地面站为包括 70 米天线的苏联 VLBI 网。

3. VSOP计划

VSOP 计划是日本的宇宙科学研究所 (ISAS)、野边山射电天文台和电波研究所 (RRL) 提出的空间 VLBI 计划^[37,38]。整个计划尚在设计中。

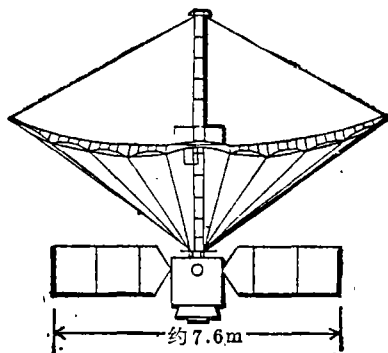


图 2 日本的 VSOP 卫星

VSOP 卫星的轨道参数为：近地点距离 1000km，远地点距离 10000km，偏心率 0.379，倾角 31°，进动率 -480°/年，近拱点角距的变化率 750°/年。天线直径为 5—10 米，效率为 0.5—0.7 (图 2)。接收系统能在 1.35 和 6cm 上作左、右旋偏振观测，接收机带宽为 50MHz，用辐射冷却法保持在 150K 左右，噪声温度为 50—100K。X 和 S 波段被用来传送数据和操作指令。由于日本缺少独立的 VLBI 网，地面的观测和跟踪需要美欧、苏联等台站的配合。

4. TDRSS——空间 VLBI 实验

TDRSS (跟踪与数据中转卫星系统) 是一个由同步卫星组成的，在地面和低轨卫星之间中转信号的系统。1986 年 7—8 月，美日科学家利用 TDRSS 在 W41° 的卫星，以深空网在澳大利亚和日本的两个 64 米天线和日本 RRL 的 26 米天线作地面观测站，以喷气推进实验室在 White Sands 的天线作跟踪，在 S 波段，带宽 14MHz 成功地观测了类星体 NRAO530, 1510-089 和 1741-038，最长投影基线达 1.4 个地球直径^[39]。1987 年 1 月进行了第二次实验，成功地观测了 23 个射电源，TDRSS 卫星位置的改变使长投影基线达 2.16 个地球直径 [图 3]^[38]。这些实验为今后的空间 VLBI 实验积累了经验。

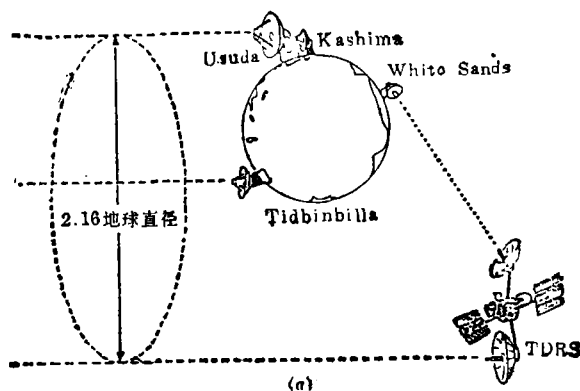


图 3 (a) TDRSS——空间 VLBI 第二次实验示意图

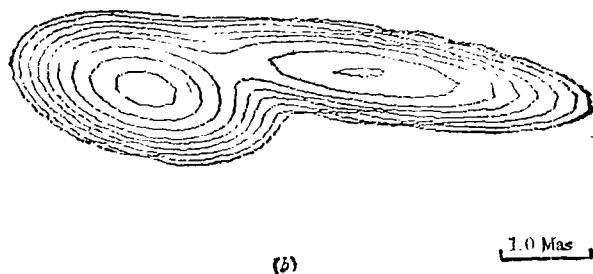


图3 (b) 由TDRSS-空间VLBI实验观测得到的射电源1127-145图像

三、结 语

目前计划中的空间VLBI较之地面VLBI, 分辨率有了成倍的提高, 但是, 为了观测更多、更远的目标, 特别是对某些物理现象(如活动星系核中心能源)的研究, 它们的分辨率仍至少差1—2个量级, 还必须在此基础上作进一步的发展。美、苏、日的空间VLBI卫星的协调、合作, 可以使分辨率再成倍地提高。另一方面, 极为需要提高观测灵敏度, 以适应目标角径更小而使相关流量更低的情况, 这要通过降低系统温度和提高天线效率来做到。

开拓空间天文学, 提高观测分辨率, 探索宇宙更深、更远的奥秘, 是人类进步、发展和提高中的一种必然追求。空间 VLBI 运用当前的尖端技术, 能大大开阔人类观测和研究宇宙的眼界, 其意义是不可低估的。

本论文得到国家自然科学基金1870613的支持。

参 考 文 献

- [1] IAU Symp., No. 129, (1987).
[2] IAU Symp., No. 110, (1984).
[3] Paulihy-Toth, I. I. K. et al, ib. [2], p149, (1984).
[4] Pearson, T. J., Readhead, A. C. S., ib. [2], p15, (1984).
[5] Preston, R. A. et al, ib. [2], p67, (1984).
[6] Wright, M. et al, ib. [1], p93, (1987).
[7] Porcas, R. W. et al, IAU Symp., No. 119, p131, (1986).
[8] Fabian, A. C., Quasat— a VLBI Observatory in Space, Proc. of a workshop held at Gross Enzersdorf, Austria, p7, (1984).
[9] Weadman, W. D., in Quasat Astronomy, p188, (1986).
[10] Burke, B. F., ib. [2], p397, (1984).
[11] Barthel, P. D. et al, ib. [2], p39, (1984).
[12] Blandford, R. D., ib. [2], p215, (1984).
[13] Begelman, C. M., ib. [2], p227, (1984).
[14] Fanti, C. et al, ib. [1], p111, (1987).
[15] Mutel, R. L., Phillips, R., ib. [1], p73, (1987).
[16] Miley, G., ib. [8], p131, (1984).
[17] Ulrich, M. H., IAU Transactions, XIXA, p327, (1985).
[18] Ulrich, M. H., ib. [2], p73, (1984).
[19] Readhead, A. C. S., ib. [8], p139, (1984).
[20] Padrielli, L., ib. [2], p169, (1984).
[21] Genzel, R. D. et al, Ap. J., 247(1981), 1039.
[22] Claussen, M. J. et al, ib. [1], p231, (1987).
[23] Haschick, A. D. et al, ib. [1], p233, (1987).
[24] Johnston, K. J., ib. [8], p187, (1984).
[25] Davis, R. J. et al, ib. [1], p277, (1987).
[26] Lestrade, J.-F., ib. [1], p265, (1987).
[27] Mutel, R. L., ib. [2], p277, (1984).
[28] Molnar, L. A. et al, ib. [1], p279, (1987).
[29] Schilizzi, R. T. et al, ib. [2], p289, (1984).
[30] Lo, K. Y., ib. [2], p265, (1984).
[31] Schilizzi, R. T., ib. [1], p441, (1987).
[32] NASA and ESA Study Teams, ib. [8], p38, (1984).
[33] NASA and ESA Study Teams, ib. [8], p89, (1984).
[34] Readhead, A. C. S. et al, ib. [8], p115, p101, (1984).
[35] Roberts, D. H., ib. [8], p115, (1984).
[36] Kardashev, N. S., Slysh, V. I., ib. [1], p433, (1987).
[37] Hisashi Hirabayashi, ib. [1], p449, (1987).
[38] Japan Space VLBI WG, in VLBI Space Observatory Program, (1987).
[39] Levy, G. S. et al, Science, 234 (1986), 187.

(责任编辑 林一梅)

Space VLBI

Wang Qiang, Zhang Fujun

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, we briefly discuss the meaning of space VLBI for the research of astrophysics and describe some space VLBI programs which are in progress.