## 观天“巨眼” 宇宙“向导”

**在地球上，有一双观天“巨眼”——中国甚长基线干涉测量（VLBI）网（CVN）。这是一个巨大的综合孔径射电望远镜，“增强版”完成后，最长基线将超过月球直径3470公里，达到3800公里。它能分成两个子网，相当于两台VLBI射电望远镜，可同时观测两个不同方向的独立天区。因此，这双“巨眼”能同时观测宇宙中的两个射电源或深空探测器。一方面，它能用于对月球与行星探测器的高精度测量与轨道确定，就像专业的向导，为探索宇宙的月球与行星探测器指引正确的方向。另一方面，它还可以用于射电天文研究，如同专注的观察者，寻找宇宙中隐藏的秘密。**

**VLBI为什么这么牛？**

将分布在不同地方的射电望远镜“连”起来，构成一台分辨率超高的综合孔径射电望远镜。

2019年4月，“事件视界望远镜”项目公布了人类拍摄的首张黑洞照片：M87星系中心的超大质量黑洞。2022年5月，天文学家再接再厉，公布了银河系中心的黑洞图像。这些图像的获得，都有个科研利器的帮助——VLBI射电望远镜。

VLBI（Very Long Baseline Interferometry），即甚长基线干涉测量技术，是采用氢原子钟,提供精确的时间基准，通过复杂的数据处理，将分布在不同地方的望远镜接收到的信号综合起来，构成一台分辨率超高的综合孔径射电望远镜。

角分辨率是望远镜的一个重要技术指标，分辨率越高，望远镜看得越清楚。对于常规望远镜，角分辨率与观测波长成反比，与口径成正比。对于VLBI望远镜，在波长一定的情况下，角分辨率与基线长度（可以理解为望远镜之间的距离）成正比，即基线越长，VLBI望远镜的分辨率越高。地基VLBI阵列的望远镜分布在全球，其基线可以长达上万公里。因此，虽然射电波段波长比可见光长得多，但是由于VLBI的基线很长，其角分辨率仍然可以很高。实际上，VLBI是角分辨率最高的天文观测技术。

20世纪60年代中后期，射电天文学家意识到，几百米至几千米基线长度的连线射电干涉仪无法分辨毫角秒量级以及更加精细的射电源结构。为了进一步提高射电天文观测的本领，射电天文学家利用当时高稳定原子频标技术和高速磁记录技术，在传统的连线干涉仪基础上，发展了“独立本振”和“磁介质记录”为特点的VLBI技术。1967年，美国Broten等人首次成功获取了VLBI干涉条纹，自此开创了射电天文学的新领域。目前VLBI普遍采用磁盘记录或高速网络直接传输宽带观测数据。

20世纪80年代以来，欧洲的VLBI网（EVN）、美国的VLBI阵（VLBA）、国际天体测量/测地VLBI网（IVS）、俄罗斯QUASAR网、日本VERA网、澳大利亚、新西兰和韩国等VLBI网相继投入使用。2007年，我国在探月工程的支持下建立了中国VLBI网（CVN）。日本和俄罗斯还实施了空间VLBI项目。目前VLBI的发展方向有：毫米波VLBI、实时VLBI、超宽带VLBI以及空间VLBI等。

得益于其极高的角分辨率，VLBI技术经常用来给宇宙中的射电源拍摄高分辨率的射电波段照片，天文学家称之为“成图”。开头提到的黑洞照片，拍摄时就使用了包括南极洲望远镜（SPT）在内的分布在全球的8台毫米波VLBI射电望远镜，其基线长度达到1.2万公里，接近地球直径，是人类在地球上能获得的最长基线。如此长的基线提供了20微角秒的分辨能力，让天文学家成功捕捉到黑洞的身影：一个明亮的环，黑洞就在中心的黑暗中。这个环是如此之小，直径只有42微角秒，相当于从地球上观察月亮上一个橘子大小的物体。需要说明的是，黑洞本身是不发光的，照片中我们看到的发光的圆环是吸积盘——物质在被黑洞吞噬之前绕着黑洞高速旋转，形成吸积盘。盘中物质被电离，在加速过程中发出射电辐射，被VLBI望远镜捕捉到。

VLBI另一个重要应用是天体测量。地球自转一周的时间是23小时56分4秒。然而，许多因素会导致地球自转时间发生变化。比如，月球和太阳对海洋的潮汐力作用会使地球转速缓慢降低，风会引起季节性的自转速度变化等等。对于日常生活，这几毫秒的变化几乎毫无影响，但是对于卫星导航、通信系统、科学研究等领域，精确的时间就非常重要了。VLBI可以通过观察一系列射电源，把地球每天自转速度的微小变化精确测量出来。

由于板块运动，我们脚下的陆地在地球上的位置并不是永恒不变的。只是这种移动速度非常慢，每年只有几厘米，根本感觉不到。VLBI通过监测参与观测的射电望远镜本身的站坐标位置变化，可以把板块的运动精确测出来。

天文学研究必须知道目标天体的精确位置，这就要建立一套坐标系。目前使用的坐标系叫做第三代国际天球参考架（ICRF3），精度达到0.1毫角秒，由300多个遥远的河外射电源共同定义。而这些射电源的高精度位置正是通过全球VLBI望远镜的长期观测确定的。

**中国VLBI网有什么用？**

在探月工程历次任务和首次火星探测任务中，发挥了不可替代的重要作用。

除了观测宇宙中的自然天体，VLBI技术还可用于给各种月球和深空探测器等人造天体测定轨、定位。通过干涉的方法，VLBI能精确测量目标射电源到达不同望远镜的时延τ。τ乘以光速即为目标到望远镜或观测站的距离差。而射电望远镜的坐标已知，通过计算可以获取探测器在天空中的方位，综合无线电测距技术，即可获得探测器在宇宙中的轨道或三维位置。VLBI技术在国际上也是深空探测任务不可或缺的重要技术手段，在探测器的关键飞行段的测定轨工作中发挥着关键作用。

中国VLBI网的发展与我国月球与深空探测工程紧密相连，发挥了关键作用。

VLBI技术是在叶叔华院士的倡导下引入我国的。1987年上海佘山25米射电望远镜建成，成为中国第一个正式的VLBI站。1994年乌鲁木齐VLBI站建成，至此中国VLBI网有了第一条基线。

2004年1月，我国正式启动了探月工程。嫦娥一号立项时，我国针对地球轨道卫星的测控主要基于无线电测距测速技术，可实现的最远测控距离约为8万公里。而嫦娥一号卫星进入绕月轨道后，最远距离达40万公里。

为解决我国当时存在的月球距离测控瓶颈，探月工程决定将VLBI技术结合已有的测距测速，共同完成对月球距离探测器的高精度测定轨。在探月工程的支持下，2006年地面应用系统建成了北京50米和昆明40米口径望远镜。中国科学院上海天文台牵头，组织中国科学院的几个天文台的优势力量，建立了由“四站一中心”组成的中国VLBI网，构建了测控系统VLBI测轨分系统，最长基线达到3200公里。当时的“四站一中心”包括上海佘山站、新疆南山站、云南昆明站和北京密云站以及位于上海天文台的VLBI数据处理中心。2012年，上海天马65米射电望远镜落成并成为CVN的新成员，同时在上海松江区建设了新的月球与深空探测VLBI中心。

这是我国深空探测测控系统的重要组成部分，目前已经圆满完成了探月工程“绕、落、回”三个阶段和我国首次火星探测任务的VLBI测定轨任务。

VLBI特有的短弧高精度测角能力在嫦娥一号任务中发挥了不可或缺的重要作用，与测距测速技术共同实现了对探测器在地月转移段、月球捕获段的快速定轨和绕月段的高精度定轨等，为确保我国首次绕月探测做出了突出贡献。自嫦娥一号以后，我国月球与行星探测工程历次深空探测任务均采用了“测距测速+VLBI测角”的新型测定轨体制，影响深远。

中国VLBI网基于自主技术，首次在国际上将实时VLBI技术用于月球与深空探测器的高精度测定轨、定位，首次建立了实时动态双目标同波束VLBI测定轨系统，具备S/X双频观测能力。除嫦娥一号外，VLBI还支持了我国嫦娥二号环月飞行、飞越日地L2点与图塔提斯小行星探测、嫦娥三号我国首次在月面软着陆、嫦娥四号国际首次实现月球背面着陆，嫦娥五号月面起飞、人类首次月球轨道无人交会对接远程导引及采样返回，以及天问一号我国首次火星绕落巡探测。

其中，嫦娥三号落月后，中国VLBI网将VLBI同波束相位参考成图技术和相位时延测量技术，首次应用于嫦娥三号月面巡视器和着陆器的相对位置测量，极大地消除了测量误差，两器相对定位精度达到1米。

经过十余年的发展，我国VLBI技术能力不断增强，总体能力已达到国际先进水平，形成了鲜明的中国特色。与此同时，佘山、乌鲁木齐、天马、昆明站还参加了EVN、IVS等国际VLBI观测网，承担了重要的面向天文研究的VLBI或单天线观测工作。

**“增强版”中国VLBI网“强”在哪儿？**

双子网可分别追踪两个目标，未来还将向空间发展，构建天地一体化的大型射电天文观测设施。

我国深空探测的不断发展和进步，对VLBI网也提出了更高要求。例如，观测目标从过去数年一个，发展到一年几个，甚至一次深空探测任务中需要同时测量在不同天区的两个目标。VLBI技术用于测定轨时，一般至少需要使用三个站同时组网观测。因此，现有的中国VLBI网“四站一中心”在同一时间段内只能测量一个目标，或者以同波束方式测量两个临近的探测器。更何况，当有不同深空探测任务同时进行时，也存在对所属不同任务的两个探测器同时测量的需求。因此VLBI网迫切需要变强。

在探月工程、上海市、中国科学院以及西藏自治区和吉林省等多方大力支持下，上海天文台目前正在西藏日喀则和吉林长白山同时建设两台40米口径的射电望远镜，预计2025年建成。两站建成后，中国VLBI网所属上海天马、上海佘山、吉林长白山、西藏日喀则、新疆南山和云南昆明站和上海VLBI中心的“六站一中心”将构成“3+3”两个VLBI子网，能够同时测量不同天区的两个探测器，综合测量能力提升一倍。

从天文观测的角度看，日喀则站和长白山站站址条件优良，无线电干扰小，尤其适合望远镜开展在高频段的观测，将为提升我国射电天文科学研究能力，推动在超大质量黑洞、致密天体快速时变及引力波电磁对应体、银河系动力学研究、高精度天地一体化参考架等一系列天文学前沿领域的研究中取得更多创新成果。作为未来要参加天文和深空探测两方面工作的多用途通用射电望远镜，两站将配置7套高灵敏度致冷接收机，实现700MHz至50GHz频谱覆盖，并具备升级到更高观测频率的潜力。

在地理位置方面，日喀则和长白山站一个坐落于青藏高原，一个耸立在林海雪原，分别是中国版图的西南和东北。它们的加入，不仅延长了基线长度，而且改善了中国VLBI网的观测覆盖。中国VLBI网最长基线将延长至3800公里，超过了月球的直径，能够更好地服务我国未来深空探测与天文观测需求。

除了地面系统，我国也正积极推进空间VLBI系统。我国将在嫦娥七号鹊桥二号中继卫星上，开展国际首个地月空间VLBI试验，验证部分空间VLBI关键技术。它也将中国VLBI网的观测基线延长至30万公里。在这个试验中，中国VLBI网的两个子网，一个将配合开展地月轨道空间VLBI观测试验，另外一个将用于精确测量中继卫星的轨道，帮助确定空间VLBI望远镜的站坐标。

与此同时，我们还正在推进“空间低频射电天文台”项目，计划发射两台口径达30米的射电望远镜进入太空。该天文台不仅可以作为独立的空间单天线运行，亦可构建独立的空间VLBI系统，或与地面的FAST、SKA等大型射电望远镜协同工作，共同构筑超高灵敏度和高分辨率的低频空—地VLBI网络，预期将在黑洞、系外行星等前沿科学领域取得重要突破。这将首次实现空—空VLBI科学观测，在低频段超越现有地面VLBI网络的分辨能力，填补高分辨率低频射电观测的空白领域，致力于解开有关“一黑两暗三起源”的重大天体物理难题。

待日喀则和长白山两台新建的望远镜加入后，中国VLBI网可以在保证测量精度的前提下，分成两个子网，同时分别追踪两个目标，就像地球上的一双明亮的眼睛，凝视着深邃的宇宙。未来，国内FAST、新疆QTT等更多地基百米口径望远镜将参加VLBI观测，中国VLBI网也将向空间发展，构成一个天地一体化的大型射电天文观测设施。我们期待，中国VLBI网未来能带来更多令人惊喜的发现，开启人类对宇宙探索的新篇章。