

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.0000.00.00

基于优化方法的空间 VLBI 轨道设计研究

石梦娜^{1,2}, 刘磊^{1,4}, 郑为民^{1,3,4}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 射电天文与技术全国重点实验室, 北京市朝阳区大屯路甲 20 号; 4. 上海市导航定位重点实验室, 上海 200030)

摘要: 随着射电天文学观测技术的快速发展, 空间甚长基线干涉测量 (Space Very Long Baseline Interferometry, SVLBI) 技术已成为实现超高角分辨率观测的核心技术手段。针对大规模全天区高分辨率射电观测的实际需求, 本研究在 Liu & Zheng (2021) 的工作基础上, 将空间 VLBI 阵列与空间望远镜的分辨率指标相融合, 将观测目标从传统单源扩展至多源场景, 并把基线长度作为核心指标, 纳入观测质量评估指数 S , 建立了基于优化方法的空间 VLBI 轨道设计方法。在此基础上, 本研究针对低频段 (300 MHz) 和高频段 (230 GHz) 两类具体任务场景分别开展仿真试验, 以验证本轨道设计方法对于不同目标源分布以及频率配置的适用性。本研究可为下一代通用型空间 VLBI 射电望远镜的轨道优化提供有益的技术思路。

关键词: SVLBI; 卫星轨道设计; 干涉仪; 高分辨率

1 引 言

甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 是一种由多台射电望远镜协同干涉工作的天文观测技术^{[1][2]}。作为当前角分辨率最高的天文观测技术, VLBI 能够分辨宇宙中微角秒量级的精细结构, 并研究其物理特性^[3]。VLBI 的角分辨率与基线长度成正比^[4]。为突破地球直径对观测分辨率的限制, 可将一台或多台望远镜部署在太空, 即空间 VLBI (Space-VLBI, SVLBI) 技术^{[5][6]}。这种向外太空拓展的干涉测量系统能够显著提升观测分辨率, 为天体物理、天体测量和深空探测研究取得进一步突破奠定技术基础^[7]。

以 uv 覆盖的均匀性作为评价标准, 针对地面射电干涉阵列的构型优化已有多种优化方法: 1997 年 Keto 采用基于等宽曲线 (如圆形、Reuleaux 三角形) 的对称阵列构型, 以提升 uv 采样的均匀性^[8]。2001 年 Bonne 提出压力算法 (Pressure Force Algorithm), 通过量化傅里叶采样分布与目标模型间的密度过剩 (excess-density), 并利用其梯度生成虚拟压力以

收稿日期: 2025-00-00; 修回日期: 2025-00-00

资助项目: 射电天文与技术全国重点实验室专项基金资助项目; 国家重点研发计划 (2022YFC2205203); 空间 VLBI 国际合作项目 “空间 VLBI 数据处理关键技术” (ZA06)

通讯作者: 刘磊, liulei@shao.ac.cn; 郑为民, zhwm@shao.ac.cn

驱动天线位置迭代优化^[9]。2004 年 Su 等人开发筛分优化算法 (sieving algorithm), 通过逐步剔除候选天线, 保留最接近目标 uv 分布的配置^[10]。2006 年 Karastergiou 等人针对低密度阵列提出了遍历优化方法, 通过全局比较筛选最优 uv 分布^[11]。2007 年 de Villiers 引入断层投影技术, 将 uv 采样点映射至一维向量空间并与理想模型对比, 建立位置修正算法, 显著提升了计算效率和优化精度^[12]。此外, 从波束图 (beam pattern) 质量的角度出发, 2000 年 Kogan 提出了一种基于旁瓣最小化的大型阵列优化方法, 通过解析求解波束方向图对天线位移的微分关系, 实现了高效迭代优化。这些方法为干涉阵列设计提供了多样化的理论框架和技术路径^[13]。

近年来, 亦有研究开始探讨针对空间 VLBI 观测的轨道设计方法。2023 年 Hudson 等人在针对超大质量黑洞周围光子环的观测优化研究中, 将轨道动力学约束纳入空间 VLBI 设计框架系统, 比较了地球轨道、地月 L2 点轨道 (EML2) 和日地 L2 点轨道 (SEL2) 三种轨道配置, 深入分析了各配置对观测性能的影响机制, 重点考察了基线长度、观测频率及轨道几何等关键参数^[14]。2024 年 Bulygin 等人则发展了一种基于 uv 覆盖逆向求解的轨道参数优化方法, 通过构建最小化目标函数 $L(X|Y)$, 将复杂的 uv 覆盖优化问题转化为轨道参数搜索问题, 并采用 Powell 优化算法有效规避了局部极小值陷阱^[15]。2025 年 Syachina 等人以 Millimetron 空间天文台轨道设计为例开展了研究。他们采用数值积分方法并引入真实力模型 (包括日-地-月系统摄动和高阶引力场谐项), 精确计算了 L2 点附近的晕轨道 (halo orbit)。该设计综合考虑了单天线观测模式与空间-地面 VLBI 模式的双重需求, 旨在确保 VLBI 成像所需的最小基线投影 (如针对 M87 和 Sgr A* 的观测), 同时满足热控稳定性和地面站通信可见性等约束^[16]。

Liu & Zheng (2021) 通过引入一个定量评估 S 指数来表征 uv 覆盖的质量。 S 指数由 uv 覆盖变换到像平面之后波束的椭率以及旁瓣/主瓣的比值加权组合构成, 指数值越小则 uv 覆盖质量越好。 uv 覆盖由空间望远镜和地面望远镜运动轨迹确定, 而空间望远镜的运动轨迹由轨道六根数确定, 因此 uv 覆盖的定量评估指数最终可以表示为轨道六根数的函数。基于上述思路, 空间 VLBI 望远镜的轨道设计问题被转化为一个优化问题, 可通过全局优化方法求解, 从而找到最佳的轨道配置。通过构建 uv 覆盖量化指标体系, 本工作为空间 VLBI 轨道设计建立了重要的理论框架与技术方法。但该方法一方面仅针对单一目标源 (M87) 开展验证, 缺乏对全天区多源观测场景及多频段适用性的系统研究; 另一方面未能将空间 VLBI 的关键性能指标——角分辨率纳入评估体系。

针对上述问题, 本文在 Liu & Zheng (2021) 所提出的方法基础上, 从两个方面进行了拓展。改进主要体现在以下两方面: 在观测目标维度实现了从单个观测源观测到全天区多源观测的扩展, 通过优化 uv 覆盖的空间分布特征, 提升了系统观测效率; 在评估体系维度, 将基线长度作为核心指标纳入观测质量评价参数。本文在低频与高频段分别选取了一个规划中的项目进行仿真测试。低频段仿真基于中国科学院上海天文台提出的空间低频射电天文台 (SLRO) 项目进行配置, 该项目计划先后发射两部部署于大椭圆轨道的 30 米口径低频射电望远镜, 观测频段为 30 MHz–300 MHz。高频段仿真则基于美国的 BHEX 项目, 该项目计划发射一台在圆形轨道运行的 3.5 米口径射电望远镜卫星, 观测频率为 230 GHz。通过改进后

的方法, 我们不仅能够更深入理解不同天区与频段下的观测特性, 还可为未来的空间 VLBI 任务提供更全面的技术支持。

本文的结构如下: 第 2 节介绍优化理论框架; 第 3 节展示该方法中具体仿真结果; 第 4 节得出结论。

2 优化理论框架

2.1 前期工作

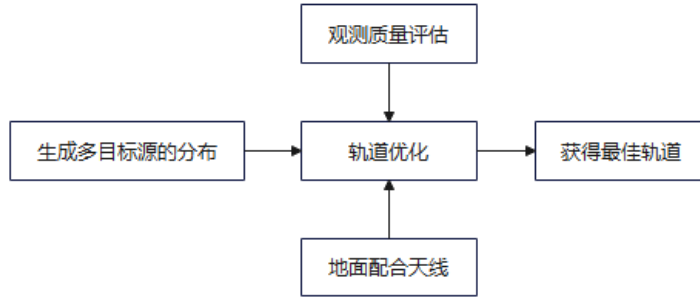


图 1 观测目标扩展优化流程图

Liu & Zheng (2021) 针对空间 VLBI 观测的轨道设计问题, 构建了基于 uv 覆盖变换到像平面波束的旁瓣/主瓣比值以及主波束椭率的观测质量定量评估的 S 指数:

$$S = w_r r_{L1} + w_e e \quad (1)$$

其中:

$$r_{L1} = (a_1 + a_2 + |a_{-1}| + |a_{-2}|) / a_0 \quad (2)$$

$$e = b_{\max} / b_{\min} - 1 \quad (3)$$

式中, w_r 和 w_e 为权重系数, a_0 表示主波束峰值强度, a_i 为第 i 个旁瓣强度, a_{-i} 表示第 i 个波谷强度, r_{L1} 表征波束旁瓣与主波束的相对强度比。 b_{\max} 和 b_{\min} 分别表示主波束的长轴和短轴, e 为量化波束的椭率^[17]。 r_{L1} 和 e 的值越小, 表明波束性能越好。具体而言, r_{L1} 越小, 代表旁瓣与主瓣的比值越低; e 越小, 代表主波束形状越接近圆形。因此, r_{L1} 与 e 共同决定了综合评估指标 S 的值: r_{L1} 和 e 越小, S 值也越小。

在具体优化方法上, Liu 和 Zheng (2021) 选用 Storn & Price (1997) 提出的差分进化算法 (Differential Evolution, DE) 对指数 S 进行优化^[18]。差分进化算法是一种基于种群的直接搜索方法, 主要用于解决连续空间全局优化问题。该算法模拟生物进化机制, 其核心思想是利用种群个体间的差异向量来生成新的候选解。在 DE 算法中, 每个个体被表示为一个

参数向量, 并通过变异 (mutation)、交叉 (crossover) 和选择 (selection) 三个主要操作迭代优化, 从而在保持全局搜索能力的同时有效避免陷入局部最优解。

2.2 对于现有方法的改进与扩展

2.2.1 分辨率权重的引入

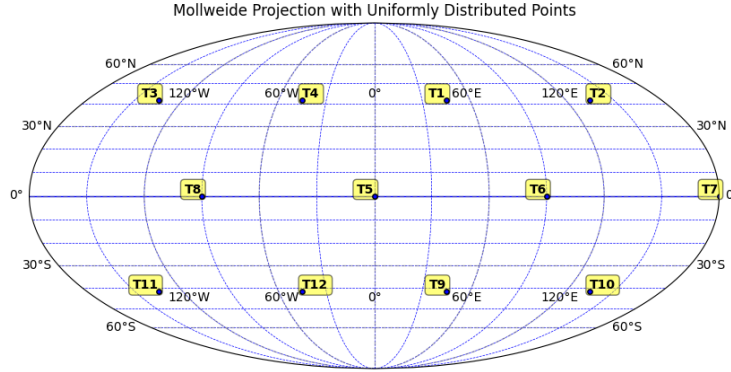


图 2 本文采用 HEALPix 算法对全天区进行优化配置, 当 $N_{\text{side}}=1$ 时将天球均匀划分为 12 个扇形区域 (如图所示)。上图展示了 300 MHz 观测频率下 12 个选定天区目标, 已分别用 T1-T12 标注。

通过分析双卫星原优化模型, 发现该方法在质量评价体系的构建上存在一定局限性, 特别是在分辨率指标的权重分配方面未能充分反映不同基线对成像质量的差异化贡献。原优化模型在构建 uv 覆盖质量评价函数时, 采用了一种简化假设, 即所有基线对最终波束形成的贡献权重均等。然而, 在实际观测中, 不同长度的基线对图像质量的提升效果具有一定的差异——较长的基线能够提供更高的空间分辨率。为了量化最长基线对于 uv 覆盖质量的贡献, 我们引入基线长度因子 R , 建立改进的评估 S 指数:

$$S = w_r r + w_e e + w_{\text{res}} R \quad (4)$$

其中, r 、 e 为 uv 覆盖质量评价函数的原始评价项, w_r 、 w_e 和 w_{res} 分别为对应项的权重系数; R 为归一化基线长度因子, 定义为:

$$R = D_{\text{Earth}} / r_{\text{max}, uv} \quad (5)$$

这里 D_{Earth} 为地球直径, $r_{\text{max}, uv}$ 为最大 uv 距离。

2.2.2 源的选取

前述工作仅聚焦于射电源 M87 在 300 MHz 单频段的特殊工况展开, 未能在天体空间分布维度上充分考虑不同天区射电源方位角分布差异对轨道构型优化结果的潜在影响。为解决这一问题, 本文提出基于全天天区覆盖 (all-sky coverage) 的观测目标扩展方案, 通过建立具有空间分布代表性和统计完备性的射电源样本库, 实现轨道优化算法的普适性提升。在

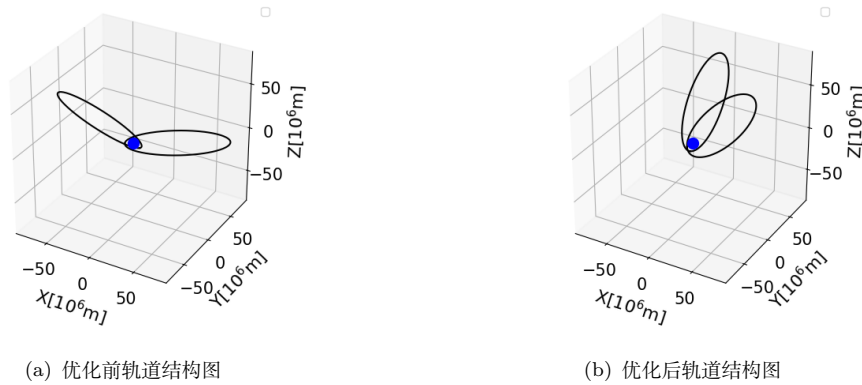


图3 在 300 MHz 观测频率下的 12 个选定天区目标优化前后的轨道图构型。优化前的性能指数 S 为 15.960371, 经优化后降至 11.231122。优化后的性能指数 S 比优化前小。 S 值越小, 轨道构型越优。

技术实现层面, 本文采用 Górski 等人在 2005 年发展的 HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization) 球面像素化算法作为天球划分的核心方法^[19]。该算法具有以下核心特征:

1. 分层结构: 算法的离散化过程采用二叉树递归架构:
 - 在基础层级 ($k=0$), 将球划分为 12 个面积相等的基准球面四边形 (对应十二面体的面)。
 - 细分规则: 每一层级下, 每个四边形可进一步等分为 4 个子四边形。若层级为第 k 层时, 每个基础网格被细分为 $N_{\text{side}} = 2^k$ 个子网格。随着层级增加, 天球的网格划分更精细。
2. 等面积: 该算法采用分层离散化方法, 将球表面划分为若干面积相等的曲面四边形单元。在给定分辨率参数 N_{side} 的条件下, 所有基础像素单元具有严格的面积一致性。
3. 等纬度: 算法构建的网格系统具有纬度对称性, 所有像素中心均位于特定的纬度环带上。当分辨率参数 N_{side} 固定时, 同一纬度带内的像素不仅满足面积守恒, 其几何形态 (如边曲率、邻接拓扑) 也保持严格一致。
4. 计算高效: 适用于大规模并行计算, 广泛应用于天文数据处理软件 (如 HEALPix 库、Astropy、HEALPy)。

这种基于 HEALPix 标准化天区划分的观测目标选择方法 (如图2所示), 能有效解决传统观测方法中存在的选择偏差问题。考虑到干涉阵列成像质量同时取决于天线空间分布和观测目标位置特性, 该方法采用 HEALPix 标准化天区划分体系, 实现了观测目标的系统性扩展, 满足了通用性望远镜对优化算法的严格要求。该方法不仅克服了传统单目标验证方法的选择偏差局限, 还为轨道优化研究提供了具有统计意义的评估基准, 为后续优化研究奠定了

算法基础。

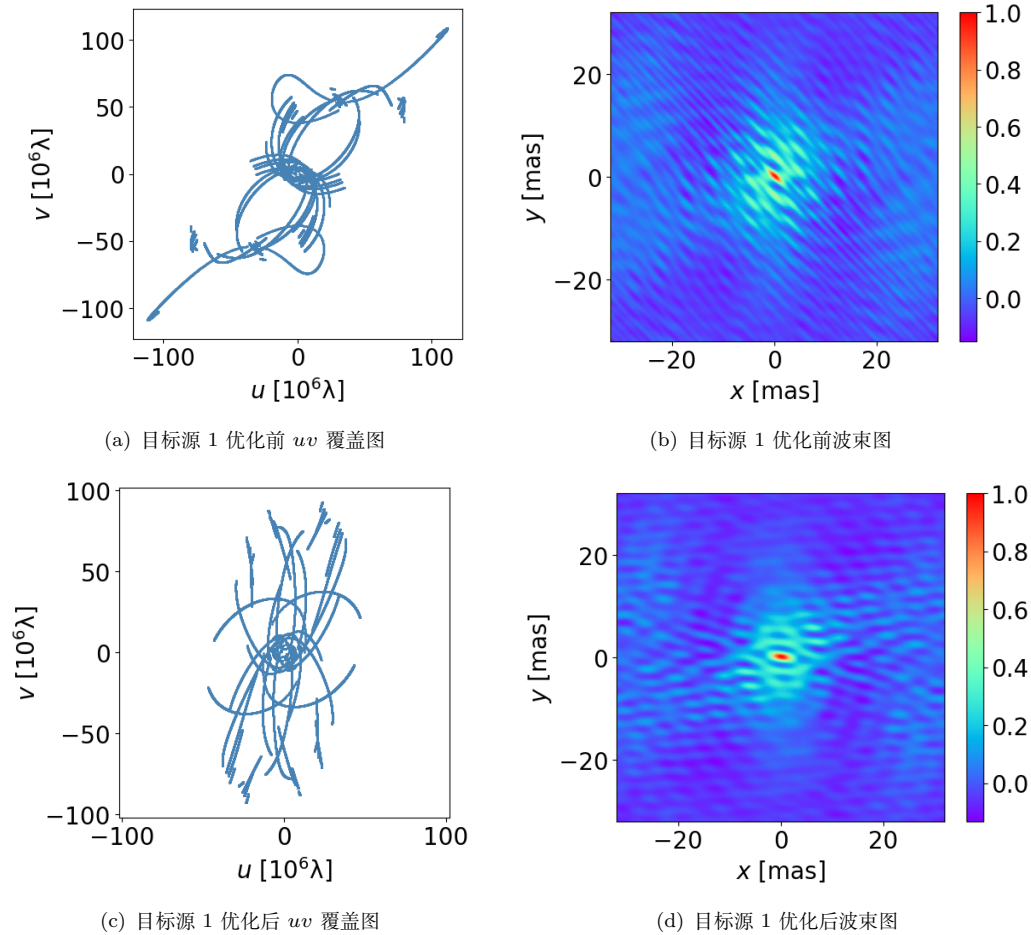


图 4 在 300 MHz 观测频率下的第一个目标源（一共选用了 12 个目标源，文中作为展示选取前两个源为代表）优化前后 uv 覆盖和合成波束对比结果。 uv 覆盖分布方面：(a) 为优化前的 uv 覆盖，(c) 为优化后的结果。对比可见，优化后的配置改善了空间频率采样的均匀性，同时扩展了基线覆盖范围。合成波束特性分析：(b) 为优化前的波束图，(d) 为优化后结果。(b)(d) 右侧的颜色棒对应数值为归一化强度 (Normalized Strength)。优化后的合成波束表现出更接近圆形的特性，且旁瓣水平明显降低（旁主瓣比减小）。轨道优化前后的对比参数在表 1 中列出。

3 仿真结果验证

为全面验证改进方法的有效性，本文设计了两种验证方案：在低频段（300 MHz），基于空间低频射电天文台项目进行配置，并采用基于 HEALPix 天区划分的系统采样策略，选取 12 个空间分布均匀的标准射电源进行全天区多目标观测仿真，以满足通用天文台的观测

	轨道优化前		轨道优化后	
S 指数	15.960371		11.231122	
	轨道 1	轨道 2	轨道 1	轨道 2
半长轴 a (km)	52378.100			
离心率 e	0.840			
轨道倾角 i (deg)	151.5	-4.6	91.4	91.6
升交点赤经 Ω (deg)	-41.3	45.9	-104.0	-104.6
近地点幅角 ω (deg)	-38.8	163.6	-4.0	-63.7

表 1 低频 300 MHz 优化前后轨道数据对比

	轨道优化前	轨道优化后
S 指数	1.869967	1.697478
半长轴 a (km)	26578.100	
离心率 e	0.000	
轨道倾角 i (deg)	-28.1	63.0
升交点赤经 Ω (deg)	-64.5	-123.6
近地点幅角 ω (deg)	162.9	-106.6

表 2 高频 230 GHz 优化前后轨道数据对比

需求; 在高频段 (230 GHz), 基于美国 BHEX 项目进行配置, 针对 M87 和 Sgr A* 这两个具有重要科学价值的优先源 (特别是黑洞观测目标) 开展深入研究, 重点评估高分辨率观测条件下的轨道优化特性。仿真结果表明, 改进后的方法在 uv 覆盖均匀性等方面展现出一定的优势。需要特别说明的是, 本文以 uv 覆盖质量作为轨道性能的评价标准。

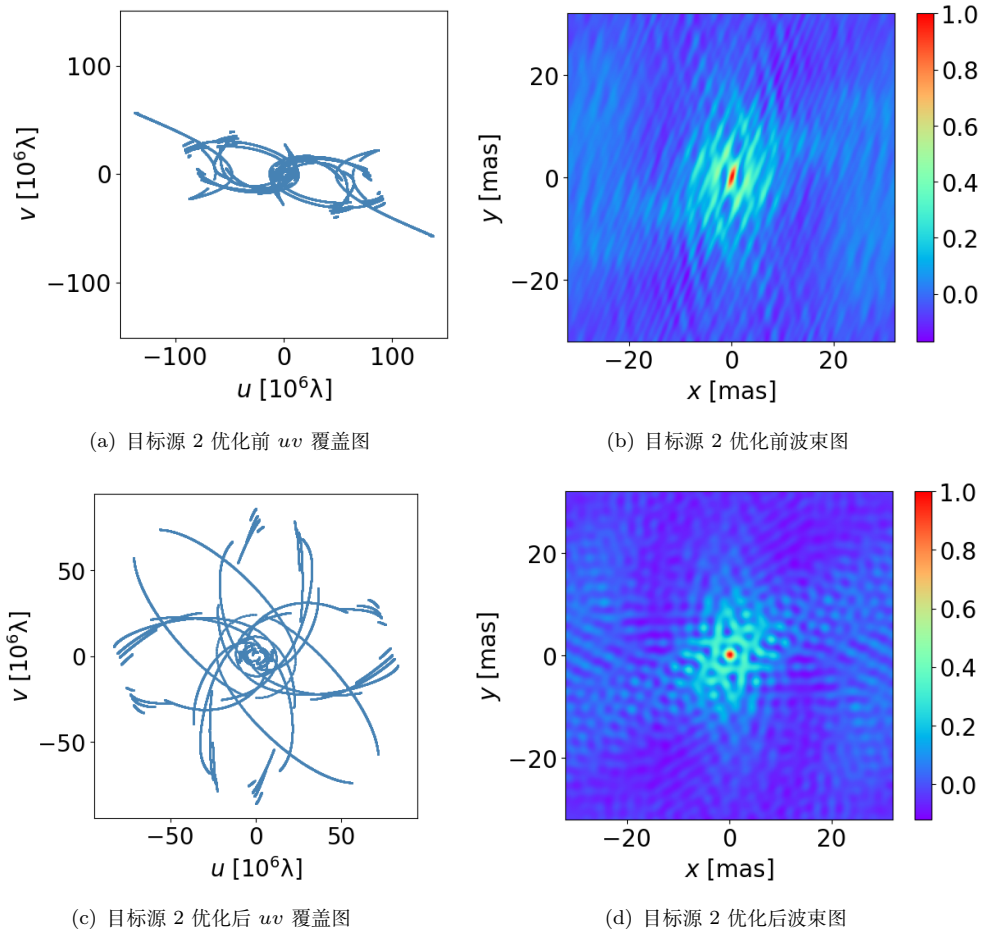


图 5 在 300 MHz 观测频率下的第二个目标源（一共选用了 12 个目标源，文中作为展示选取前两个源为代表）优化前后 uv 覆盖和合成波束对比结果。在 uv 覆盖分布方面：(a) 为优化前的 uv 覆盖，(c) 为优化后的结果。对比可见，优化后的配置改善了空间频率采样的均匀性，同时扩展了基线覆盖范围。合成波束特性分析：(b) 为优化前的波束图，(d) 为优化后结果。(b)(d) 右侧的颜色棒对应数值为归一化强度 (Normalized Strength)。优化后的合成波束表现出更接近圆形的特性，且旁瓣水平明显降低（旁主瓣比减小）。轨道优化前后的对比参数在表 1 中列出。

以下仿真均采用 Liu 等开发的 OmniUV 工具包实现。该工具包是一种面向 VLBI 的多功能仿真框架，支持空间（如地月轨道、拉格朗日点等）与地面观测站的联合模拟^[20]。其核心功能包括：(1) 轨迹计算；(2) uv 计算；(3) 可视度模拟；(4) 图像和波束重建^[20]。该工具为干涉观测的阵列设计与成像质量评估提供了通用化仿真平台^[20]。

3.1 全天区选源

3.1.1 观测设置

联合观测假设于协调世界时 2028 年 7 月 15 日 00:00:00 (UTC) 启动, 将进行为期 24 小时的连续观测。项目配置基于中国科学院上海天文台提出的空间低频射电天文台项目, 计划发射两颗配备 30 米口径天线的空间望远镜卫星, 并联合地面五大射电天文设施组成协同观测阵列。具体包括: 新疆奇台 110 米射电望远镜 (QTT)、中国 500 米口径球面射电望远镜 (FAST)、澳大利亚 SKA 低频阵列 (SKA-low)、德国埃费尔斯贝格 100 米射电望远镜 (Effelsberg) 以及美国绿岸望远镜 (GBT)。观测采用 300 MHz 频率, 通过 HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization) 全天区划分算法 (基于 scipy 科学计算库实现) 选取了 12 个目标源。该算法将天球划分为 12 个等面积像素 ($N_{\text{side}}=1$), 其空间分布如图 2 所示 (采用 Mollweide 投影方式展示)。

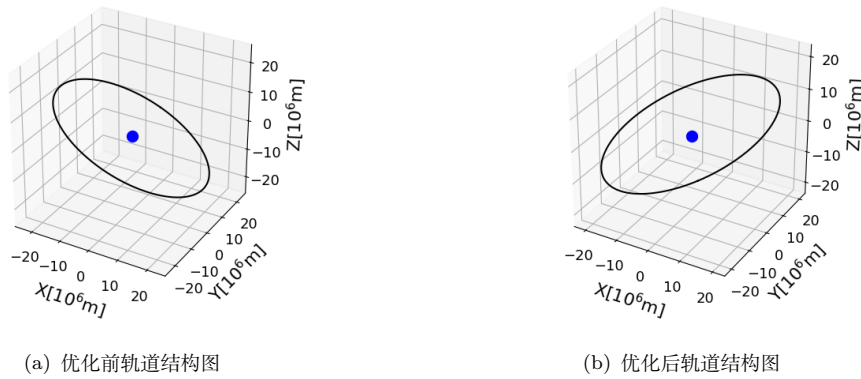


图 6 在 230 GHz 观测频率下 M87 和 Sgr A* 轨道构型优化前后的对比结果。(a)(b) 分别呈现了优化前后的轨道构型示意图。优化前的性能 S 指数为 1.86967, 经优化后降至 1.697478。 S 值的降低表明 uv 覆盖质量得到提升, 并由此获得了更优的轨道构型。

3.1.2 优化结果

轨道优化采用差分进化算法 (Differential Evolution, DE), 通过 Scipy 科学计算库实现。观测频率设定为 300 MHz, 图像像素的单元大小 (cell size) 配置为 0.25 毫角秒 (mas)。轨道参数固定了轨道的半长轴 (a) 和偏心率 (e), 其约束条件为远地点高度 90,000 km 和近地点高度 2,000 km。由于半长轴和偏心率已确定, 优化变量仅涉及以下两组轨道的 8 个轨道根数: 轨道倾角 (i)、升交点赤经 (Ω)、近地点幅角 (ω) 和参考历元平近点角 (M)。该优化策略在保证轨道几何约束的同时, 有效降低了参数空间的维度, 提高了计算效率。

优化前后的观测轨道分布呈现出一定的差异, 如图 3 所示。根据表 1 中的量化分析结果, 优化前的 S 指数为 15.960371, 优化后降至 11.231122。 S 指数值越小, 代表 uv 覆盖质量越好, 成像质量越高, 表明优化后的轨道构型更优。同时, 数据表明轨道形状参数 (半长轴

a 与离心率 e) 未参与优化。轨道 1 的轨道倾角 i 从 151.5° 变为 91.4° , 轨道 2 的 i 则从 -4.6° 调整至 91.6° , 均发生了较大变化; 升交点赤经 Ω 与近地点幅角 ω 也发生了大幅改变。上述变化充分证明了优化算法对于多个目标源的优化依然有效。图4和图5展示了 12 个目标源 (图中仅选取了前两个源为代表) 在优化前后的 uv 覆盖图及波束图的对比结果。可以清晰地观察到: 优化后的 uv 覆盖范围得到了扩展, 采样点分布更加均匀, 尤其在短基线和高空间频率区域获得了更完整的覆盖; 波束特性得到提升: 优化后的主波束形态更接近理想圆形, 旁瓣水平得到有效抑制, 表明阵列的成像分辨率和动态范围均有所提高; 图像分辨率也有所提升。这些结果一致表明, 所采用的优化方法改善了 VLBI 的观测性能, 为后续科学数据的质量提供了可靠保障。

3.2 高频频段验证

3.2.1 观测设置

观测时间设定与 3.1.1 节所设相同, 项目配置基于美国 BHEX 项目, 观测系统计划发射一颗搭载 3.5 米口径天线的空间望远镜卫星, 并与地面七大射电天文台站组成联合阵列。具体包括: 阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列 (ALMA)、阿塔卡马探路者实验望远镜 (APEX)、墨西哥大型毫米波望远镜 (LMT)、西班牙 IRAM 30 米望远镜 (Pico Veleta)、美国亚毫米波望远镜 (SMT)、夏威夷詹姆斯·克拉克·麦克斯韦望远镜 (JCMT) 以及次毫米波阵列望远镜 (SMA)。

3.2.2 优化结果

观测频率设定为 230 GHz, 图像像素的单元大小 (cell size) 配置为 0.001 毫角秒 (mas)。在轨道参数方面, 我们固定了轨道的半长轴 (a) 和偏心率 (e), 其约束条件为远地点高度和近地点高度均为 20,200 km。

如图6所示, 优化前后的轨道分布仍存在明显差异。优化后的 S 指数由 1.86967 降至 1.697478。 S 值的降低反映了 uv 覆盖质量和成像质量的有效提升, 表明优化后的轨道构型表现更优。由表2可见, 卫星轨道的关键参数在优化前后发生了一定的变化。从轨道根数来看, 半长轴 a 和离心率 e 未参与优化。轨道倾角 i 由 -28.1° 调整为 63.0° , 升交点赤经 Ω 和近地点幅角 ω 均发生了较大幅度的调整。这些数值结果验证了优化算法在高频段观测中的有效性。

图7和图8分别展示了 M87 和银河系中心 (Sgr A*) 两个典型目标源在干涉测量性能上的改善情况: uv 覆盖更为充分, 采样点数量增加; 波束特性也有一定的提升, 优化后的主波束更接近圆形, 旁瓣与主瓣的比值降低, 并且分辨率进一步提高。

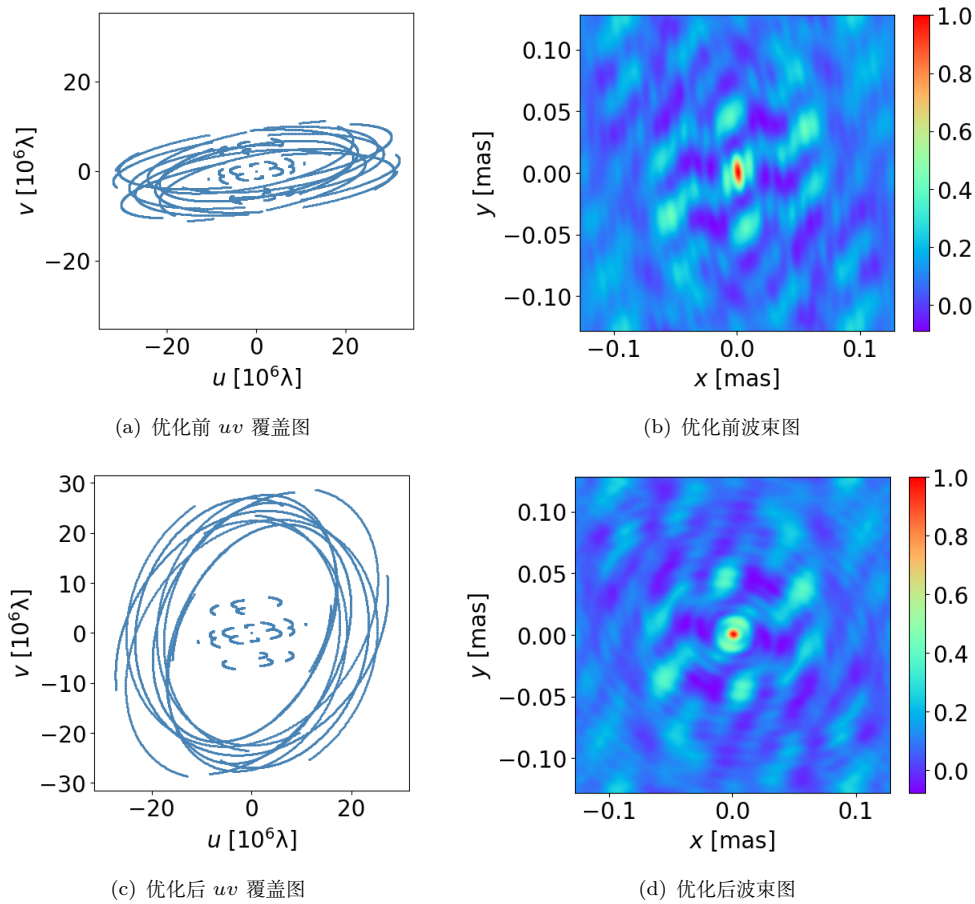


图 7 在 230 GHz 观测频率下 M87 优化前后 uv 覆盖和合成波束对比结果。在 uv 覆盖分布方面: (a) 为 M87 源优化前的 uv 覆盖, (c) 为 M87 优化后的 uv 覆盖。优化后配置提升了空间频率采样的均匀性, 并扩展了基线覆盖范围。在合成波束特性方面: (b) 为 M87 优化前的波束图, (d) 为 M87 优化后的波束图。(b)(d) 右侧的颜色棒对应数值为归一化强度 (Normalized Strength)。优化后的波束表现出更接近圆形的特性, 且旁瓣水平有所降低 (旁主瓣比减小)。轨道优化前后的对比参数在表 2 中列出。

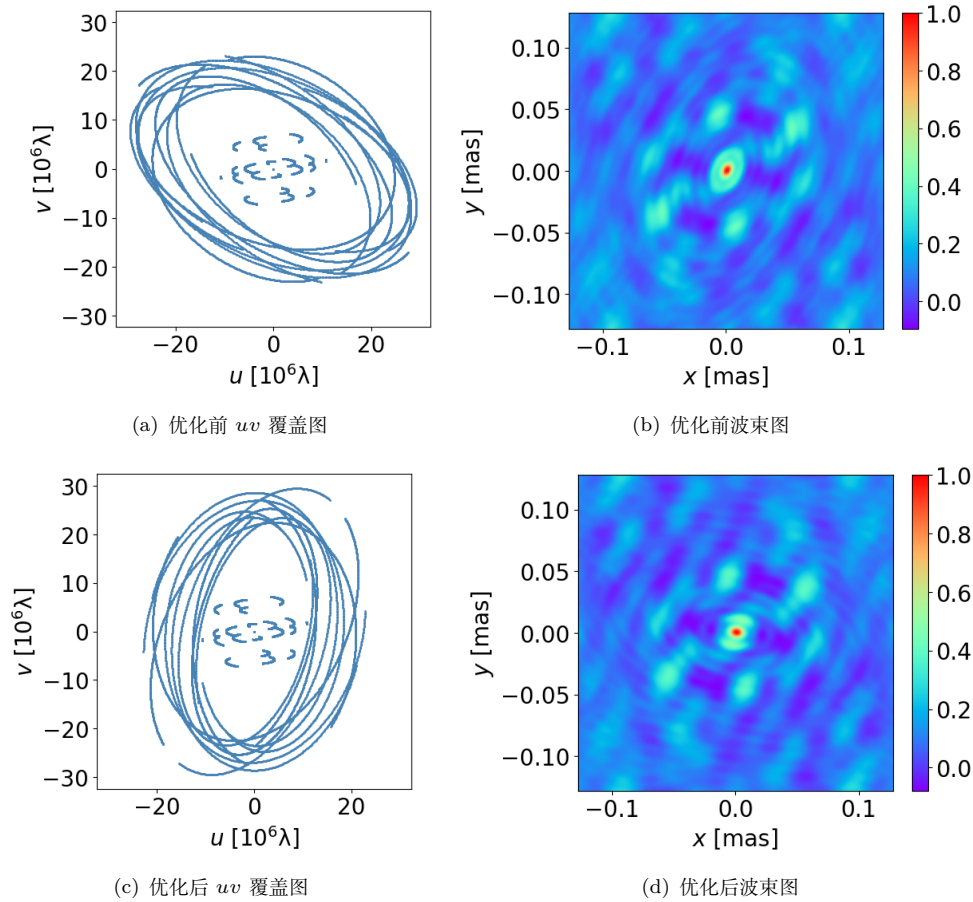


图 8 在 230 GHz 观测频率下银河系中心 (Sgr A*) 优化前后 uv 覆盖和合成波束对比结果。在 uv 覆盖分布方面: (a) 为银河系中心 (Sgr A*) 优化前的 uv 覆盖, (c) 为银河系中心 (Sgr A*) 优化后的 uv 覆盖。优化后的空间频率采样均匀性有所提高, 基线覆盖范围有所扩展。在合成波束特性方面: (b) 为银河系中心 (Sgr A*) 优化前的波束图, (d) 为银河系中心 (Sgr A*) 优化后的波束图。(b)(d) 右侧的颜色棒对应数值为归一化强度 (Normalized Strength)。优化后的波束表现出更接近圆形的特性, 且旁瓣水平有所降低 (旁主瓣比减小)。轨道优化前后的对比参数在表 2 中列出。

4 结论

Liu 与 Zheng (2021) 提出了一种基于优化方法的轨道设计框架, 以满足空间 VLBI 观测任务的特定需求。该框架引入了一个用于定量评估 uv 覆盖质量的指标, 并通过最小化该指标来确定最优的轨道构型。该方法被用于对由两台空间 VLBI 望远镜构成的低频射电天文项目 (地球大椭圆轨道, 远地点高度 90,000 km, 近地点高度 2,000 km) 轨道进行仿真。

本研究在此基础上, 通过系统性方法改进, 提升了观测质量评估的准确性以及轨道优化

效果。具体包括: 1. 将空间分辨率指标整合至 uv 覆盖量化体系, 构建了包含波束椭率, 旁瓣水平以及基线长度等多个参数的目标优化函数, 并升级算法使现有框架支持针对多个目标源的联合优化。2. 在低频段 (300 MHz), 基于 HEALPix 算法选取的 12 个全天区目标源仿真表明, 优化后的 uv 覆盖分布更为均匀。主波束 (main lobe) 的椭率得到明显优化, 旁瓣比明显降低, 减少了旁瓣对主波束信号的干扰。3. 在高频段 (230 GHz) 针对 M87 和银河系中心 (Sgr A*) 的仿真显示, 优化后的 uv 覆盖质量有所提升, 充分验证了算法在不同的观测波段的适用性。

参考文献:

- [1] Moran J M. Very Long Baseline Interferometry[J]. *Highlights of Astronomy*, 1989, 8: 553-554
- [2] Krinkele K, Jekabsons N, Shmeld I, et al. Development and deployment of distributed e-VLBI components[C]//Proceedings of the EGI Community Forum 2012/EMI Second Technical Conference (EGICF12-EMITC2). 26-30 March. 2012: 33
- [3] Schilizzi R. A short history of space VLBI[J]. *Resolving the Sky-Radio Interferometry: Past, Present, and Future*, 2013
- [4] Thompson A R, Moran J M, Swenson G W. *Interferometry and synthesis in radio astronomy*[M]. Springer Nature, 2017
- [5] Hirose H, Hirabayashi H, Kobayashi H, et al. Space VLBI satellite HALCA and its engineering accomplishments[J]. *Acta Astronautica*, 2002, 50(5): 301-309
- [6] Burke B F. *Orbiting vlbi: A survey*[C]//Symposium-International Astronomical Union. Cambridge University Press, 1984, 110: 397-403
- [7] Xiaoyu H, Xiuzhong Z, Weimin Z, et al. Research progress of VLBI technology and application to China lunar exploration project[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(4): 321-331
- [8] Keto E. The shapes of cross-correlation interferometers[J]. *The Astrophysical Journal*, 1997, 475(2): 843
- [9] Boone F. Interferometric array design: Optimizing the locations of the antenna pads[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, 377(1): 368-376
- [10] Su Y, Nan R D, Peng B, et al. Optimization of interferometric array configurations by “sieving” $u-v$ points[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 414(1): 389-397
- [11] Karastergiou A, Neri R, Gurwell M A. Adapting and expanding interferometric arrays[J]. *The astrophysical journal supplement series*, 2006, 164(2): 552
- [12] De Villiers M. Interferometric array layout design by tomographic projection[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 469(2): 793-797
- [13] Kogan L. Optimizing a large array configuration to minimize the sidelobes[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2000, 48(7): 1075-1078
- [14] Hudson B, Gurvits L I, Wielgus M, et al. Orbital configurations of spaceborne interferometers for studying photon rings of supermassive black holes[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 213: 681-693
- [15] Bulygin I I, Shchurov M A, Rudnitskiy A G. Estimation of orbital parameters from (u, v) -coverage for a space radio interferometer[J]. *Astronomy and Computing*, 2024, 48: 100855
- [16] Syachina T A, Rudnitskiy A G, Mzhelskiy P V, et al. Orbit design for the Millimetron space observatory[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 229: 128-139
- [17] Liu L, Zheng W M. The optimization of satellite orbit for Space-VLBI observation[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(2): 037
- [18] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous

-
- spaces[J]. *Journal of global optimization*, 1997, 11: 341-359
- [19] Gorski K M, Hivon E, Banday A J, et al. HEALPix: A framework for high-resolution discretization and fast analysis of data distributed on the sphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 622(2): 759
- [20] Liu L, Zheng W, Fu J, et al. OmniUV: a multipurpose simulation toolkit for VLBI observation[J]. *The Astronomical Journal*, 2022, 164(2): 67

Research on Orbit Design for Space VLBI Based on Optimization Methods.

SHI Meng-na^{1,2}, LIU Lei^{1,4}, ZHENG Wei-min^{1,3,4}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;; 3. National Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, No. 20A Datun Road, Chaoyang District, Beijing, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Navigation and Positioning, Shanghai 200030, China)

Abstract: With the rapid development of radio astronomy observation technology, Space Very Long Baseline Interferometry (SVLBI) has become a core technical means for achieving ultra-high angular resolution observations. To address the practical needs of large-scale, all-sky, high-resolution radio observations, this study builds upon the work of Liu & Zheng (2021). We integrate the resolution metrics of space VLBI arrays and space telescopes, extend the observational targets from traditional single-source scenarios to multi-source contexts, incorporate baseline length as a core parameter into the observational quality evaluation index S , and establish an optimization-based orbit design method for space VLBI. On this foundation, we conduct simulation experiments for two specific mission scenarios: low-frequency (300 MHz) and high-frequency (230 GHz) bands, to validate the applicability of the proposed orbit design method across different target source distributions and frequency configurations. This research can provide valuable technical insights for the orbit optimization of next-generation, general-purpose space VLBI radio telescopes.

Key words: SVLBI; Satellite orbit design; interferometer; high resolution