

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.20**.01.01

基于基线长度的地月空间 射电综合孔径效果评估方法研究

刘 畅^{1,2}, 郑为民^{1,3,4}, 刘 磊^{1,3,4}, 童锋贤^{1,3,4}, 童 力^{1,3,4}, 张 娟^{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 100101; 4. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030;)

摘要:

我国正在规划建设环月球通信导航卫星星座, 实现全月通信遥感以及区域导航, 为后续深空探测任务提供技术支持。为充分发挥这一星座的综合效益, 也正在考虑利用环月球通导卫星上搭载的测控通信空间抛物面天线与地面射电望远镜开展射电天文空间 VLBI 观测研究。由于通导卫星测控通信天线口径较小, 限制了天文观测灵敏度。为提高观测灵敏度, 拟采用将多面小口径天线合成为更大口径天线的思路。本文基于射电源相关流量密度与投影基线长度的经验关系进行建模, 提出一种空间天线合成效果的评估方法, 最后参考月球通信导航星座轨道进行仿真。计算表明, 在采用多种轨道构型, 观测不同致密程度的射电源时, 该方法可较好地评估空间天线阵所能达成的合成效果, 为后续空间 VLBI 星座设计的合成效果评估提供技术支持。

关 键 词: 空间 VLBI; 天线合成; 自校准; 基线效率

中图分类号: P111.44 文献标识码: A

1 引言

在甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 中, 当观测频率一定时, 其角分辨率正比于基线长度。但地基 VLBI 的基线长度受限于地球的直径, 若将射电望远镜送入太空, 则其可与地面或空间望远镜构成空间 VLBI 系统 (Space VLBI), 突破地球直径的限制, 进而获得更高的角分辨率^[1]。国内外都在积极发展空间 VLBI 技术。

国际上已成功实施 VSOP 与 RadioAstron 两个专门的空间 VLBI 项目。日本于 1997 年实施 VSOP (VLBI Space Observatory Programme) 项目, 发射了全球首颗空间 VLBI 卫

收稿日期: 2025-**-** ; 修回日期: 2025-**-**

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2205203);

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

星, 配备一面 8 米口径空间望远镜, 观测频率范围包括 1.60-1.73 GHz、4.7-5.0 GHz 和 22.0-22.3 GHz。由于在轨运行后, 22 GHz 频段灵敏度显著下降, 因此后续观测主要集中在 1.60 GHz 和 5.0 GHz 频段^[2]。俄罗斯于 2011 年由天顶-3F (Zenit-3F) 运载火箭在拜科努尔发射场发射 RadioAstron (Spektr-R), 搭载一面 10 米口径射电望远镜, 工作频率为 0.3, 1.6, 5, 22 GHz。RadioAstron 与俄罗斯、美国和澳大利亚等国的地面望远镜成功开展了空地 VLBI 观测^[3], 创造了 VLBI 最长基线记录, 实现了 8 微角秒分辨率。

此后, 国内外还提出了诸多空间 VLBI 的构想与计划。上海天文台也提出了高频和低频两个空间射电天文项目。例如, 在中国科学院背景型号研究项目的支持下, 毫米波段的空间 VLBI 阵列 SMVA^[4] (Space Millimeter VLBI Array), 已设计并研发了用于空间天文观测的 10 米口径高精度星载可展开天线原理样机。工作频段为 30MHz-1.7GHz 的空间低频射电天文台项目^[5] 计划发射两个 30 米口径射电望远镜至地球椭圆轨道。该项目既可与地面大型射电望远镜组成空-地 VLBI 阵列, 又可独立开展空-空干涉观测, 从而同时获得高分辨率和高灵敏度。

日本在 VSOP 任务成功后, 提出了新一代空间 VLBI 项目 VSOP-2。VSOP-2 旨在进一步提升性能, 探索更高频率的宇宙射电信号, 提高射电天文观测的灵敏度和分辨率。由于多种原因, 该项目于 2011 年取消^[6]。继 RadioAstron 项目后, 俄罗斯科学院列别捷夫物理研究所 (LPI) 和俄罗斯航天局 (Roscosmos) 共同发起了 Millimetron 项目。该项目计划发射一台装配直径 10 米口径宽频带的科学卫星 Spektr-M, 与地面望远镜组成干涉测量系统, 开展极高角分辨率的科学观测。该项目已获得俄罗斯联邦政府的正式立项, 并被纳入 2016 至 2025 年的俄罗斯联邦空间项目^[7]。

近年来随着重返月球的浪潮兴起, 各国纷纷提出了多个月球通信导航遥感的星座计划, 主要针对支持人类开展的月球科研活动。2020 年, NASA 为支持月球探索项目 Artemis 计划提出了月球网 LunaNet 架构, 以满足月球表面与附近的宇航员和航天器之间的通信需求。NASA 在 2022 年提出建设月球通信中继与导航系统 (LCRNS) 的设想, 计划部署多颗运行在月球轨道上的卫星^[8]。欧空局 (ESA) 在 2021 年提出了月光 Moonlight 项目, 计划在 2027 年前后建成可持续的月球通信与导航系统 (LCNS), 首先发射“月球探路者”卫星, 随后逐步部署其他卫星, 计划于 2028 年初步运行该系统^[9]。日本 JAXA 提出了月球导航卫星系统 (LNSS) 的设想, 计划在月球椭圆轨道上部署 8 颗卫星, 为月球南极地区的探测器提供中继通信和导航定位服务^[10]。美国、欧洲、日本的 LCRNS、LCNS、LNSS 系统的建设将参考 LunaNet 月球网的规范, 以确保未来月球基础设施的兼容性, LunaNet 月球网建成后将会为射电观测提供新的平台^[8]。但这些月球通导星座项目, 尚未有空间 VLBI 计划。

我国也正在论证构建用于月球通信导航的鹊桥通导遥星座, 至今已部署了鹊桥一号、鹊桥二号两颗专门月球中继星和、天都一号、天都二号两颗试验月球中继星^[11]。如何利用月球通信卫星所处的独特空间环境开展射电天文观测一直在论证中。我国于 2024 年 3 月 20 日发射的鹊桥二号中继星。除了为嫦娥六号和嫦娥七号任务提供地月间的中继通信服务外^[12], 鹊桥二号携带了 VLBI 科学载荷, 和搭载的 4.2 米口径抛物面通信天线, 共同组成了月球轨道 VLBI 试验系统 (LOVEX, Lunar Orbit VLBI EXperiment)。LOVEX 由制冷接

收机、数字数据采集终端和氢原子钟等一系列 VLBI 设备组成, 这些设备与中继星的天线、固存和数传等设备一起, 构成了一个月球轨道 VLBI 观测站^[13], 走出了利用月球通信卫星开展空间 VLBI 观测试验的第一步。LOVEX 能够与地面的 VLBI 台站协同工作, 形成一个月-地 VLBI 网络, 是国际上首个在月球轨道上实施的 VLBI 项目, 预期将天体物理、天体测量、深空探测器测定轨等领域获得一系列原创性成果。^[14]

为满足后续月球探测需求, 我国正在考虑将鹊桥通导遥星座项目纳入国际月球科研站项目^[15], 未来有望发射多颗月球轨道卫星, 建设地月飞行器骨干链路, 实现全月通信遥感以及区域导航, 为后续深空探测任务提供技术支撑^[16]。该项目亦在规划如何利用地面射电望远镜与月球通导卫星星座构建超长空间基线, 开展地月空间 VLBI 观测^[17]。

VLBI 的灵敏度与天线阵中的天线有效面积成正相关, 而受现有工程限制, 目前只能将米级小口径抛物面天线送入月球空间。若将空间多面小口径天线合成一个等效的大口径天线, 可提高空间 VLBI 系统的灵敏度, 进而提高空间 VLBI 的测量精度。

本文以我国的鹊桥通导遥星座项目为背景, 提出了一种基于基线长度的地月空间射电综合孔径评估方法。研究内容主要包括 uv 平面基线长度 (uv 长度) 对天线合成效果的影响、天线合成评估算法的设计。我们在研究过程中发现, 实际信号合成 (时间、频率、相位对齐) 依赖于干涉方法进行校正。在此过程中, 射电源延展结构的存在造成其流量随基线长度的增加而降低, 基线越长校正效果越差。本工作通过对射电源结构、基线长度与合成效率的关系进行建模, 探究了基线长度对天线合成效果的影响, 进而提出一种天线合成效果评估方法。通过对六个模拟天线的合成效果进行仿真, 结果表明, 该方法可以较好地评估天线阵在观测不同类型源时的天线合成效果。

2 基于空间 VLBI 的天线合成效果评估算法

2.1 空间 VLBI 天线合成评估方法设计

2005 年, Y. Y. Kovalev 等通过分析 VLBA 的实测数据, 得出了 VLBI 基线归一化的可见度数据幅度随着 uv 长度变化经验规律^[18]。如图 1^[18] 所示, 研究发现归一化的可见度 (V) 会随着 uv 长度 (r_{uv}) 的增加而降低。这里可见度的降低主要是因为源具有延展结构, 随着基线增长, 分辨率提高, 源被分解, 流量降低^[19], 导致校准精度下降^[20]。由于不同类型的源具有不同的延展性, 因此针对不同观测目标源进行观测时, 其可见度随着 uv 长度变化而变化的幅度也不同。该研究分别总结了 BL Lacs、Quasars、Galaxies 的观测数据以及所有观测对象 (*All*) 的平均观测数据, 得到了图中相应的四个可见度 (V) 随 uv 长度 (r_{uv}) 变化的规律。

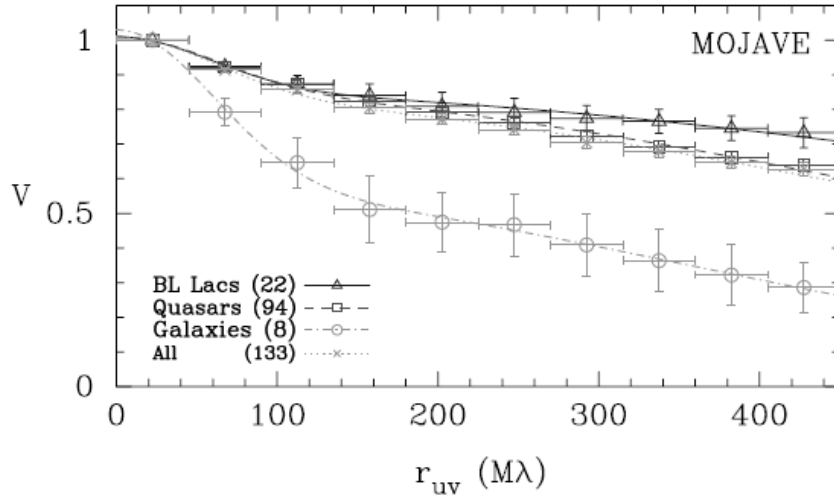


图 1 VLBI 基线归一化的可见度数据幅度变化^[18]

目前尚没有研究从理论上推导空间 VLBI 天线的 uv 长度对天线合成效率的影响, 本文将基于图 1^[18] 的经验关系开展天线合成效率研究。

根据目标源延展性的不同, 可将目标源分为延展源、致密源与点源三种情况分开讨论^[19]。图 1 中, 星系为延展源, 选择星系的经验关系曲线作为延展源的代表。BL Lacs 类天体与类星体均为致密源。在致密源中, 类星体更具有代表性, 因此选择类星体的经验关系曲线作为致密源的代表。由于已经就目标源延展性的不同进行了分类讨论, 不再研究图 1 中所有观测对象 (*All*) 平均观测数据的经验关系曲线。通过对图 1 中类星体、星系的经验关系曲线数据进行拟合, 可得到不同的经验规律函数, 其中 r_{uv} 表示 uv 长度, V 表示归一化的可见度。

对于以星系为代表的延展源, 拟合公式如下:

$$V = \begin{cases} 3.3 \times 10^{-6} r_{uv}^2 - 1.92 \times 10^{-3} r_{uv} + 1.04 & \text{if } 20 < r_{uv} < 200 \\ -6.75 \times 10^{-4} r_{uv} + 0.92 & \text{if } 200 \leq r_{uv} < 1362 \end{cases} \quad (1)$$

对于以类星体为代表的致密源, 拟合公式如下:

$$V = \begin{cases} 1.23 \times 10^{-5} r_{uv}^2 - 5.53 \times 10^{-3} r_{uv} + 1.11 & \text{if } 20 < r_{uv} < 200 \\ -9.0 \times 10^{-4} r_{uv} + 0.67 & \text{if } 200 \leq r_{uv} < 744 \end{cases} \quad (2)$$

在拟合公式中, r_{uv} 限制在 $20M\lambda$ 以上。作出这种限制是因为该公式是基于长基线实验数据拟合得到的。本文使用的拟合数据, 其最短基线长度是 $20M\lambda$ 左右。限制 r_{uv} 的最小值能够确保拟合公式在数据范围内有效。此外, 空间天线合成时, 基线通常较长, 超过 $20M\lambda$, 公式在这一范围内具有实际价值。根据以上关系, uv 长度增加引起可见度幅度 V 下

降。这会导致天线间校准精度下降^[20], 从而导致天线合成效率 η 的下降。天线合成效率与可见度幅度的关系可写为:

$$\eta = f(V) \quad (3)$$

本文根据 η 和 V 之间的关系进行建模: 当 V 的值下降时, η 会随之下降。作为这个领域研究的第一步, 我们对 η 和 V 之间的关系采用一阶近似, 当 $V=0$ 时, $\eta=0$:

$$\eta = kV \quad (4)$$

我们用天线的等效合成面积来表征天线的合成效果, 设基准天线的面积为 A_0 , 每当有一个天线 i 参与合成, 其对等效合成面积的增益为 $A_i \cdot \eta_i$, A_i 为天线 i 的有效面积, η_i 为天线 i 与基准天线之间的天线合成效率。基准天线的面积加上所有参与合成的天线对其的增益即为天线合成后的等效面积 A , 计算公式如下:

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot \eta_i \quad (5)$$

将式 (4) 带入可以得式:

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot kV_i \quad (6)$$

通过上面的分析, 我们得到了一个基于基线长度评估地月空间天线合成效果的公式, 在该公式中, 参数 k 作为一个可调参数, 其取值受到天线指向精度、有效接收面积、系统噪声温度等多重因素的共同影响, 最大值为 1, 其大小仅影响天线合成等效面积随时间变化的幅度, 不影响天线合成等效面积随时间变化的规律。

2.2 基于空间 VLBI 的天线合成评估算法流程

理想情况下, 在空间 VLBI 的空间天线阵中, 天线之间的距离远近、相对源的角度等因素不会影响合成的效果。然而在实际观测中, 由于系统误差、具有延展结构的源被分解等因素, 天线之间的方位关系, 天线与源之间的方位关系都会对天线合成效果产生影响。

通过第 2.1 节的分析, 我们得出了 uv 长度与合成后的天线等效面积的关系公式。在空间天线合成中, 想要得到某一个时刻天线合成后的天线等效面积, 我们只需要得到该时刻天线阵中每条基线的 uv 长度。此外, 空间天线的合成也要考虑空间天线阵列中的天线由于遮挡接收不到信号的情况。空间天线接收不到信号主要是因为当空间天线绕天体运行时, 有可能出现天线与观测源之间被月球遮挡的情况^[21]。每个空间天线都需要通过天线的轨道结合源的方位将可能出现以上遮挡情况的时刻计算出来, 并在最终计算整个天线阵的天线合成等效面积时, 去掉失效的天线贡献的合成增益。

将算法划分成两步进行程序开发。第一步, 算法通过处理空间天线阵的轨道数据, 计算出所有基线在每个采样时刻的 uv 长度, 并对每条基线的可用性做出标记。第二步通过利用

第一部分算法得到的基线数据，经过计算得出每个采样时刻的天线阵合成效果。程序流程图如图 2。

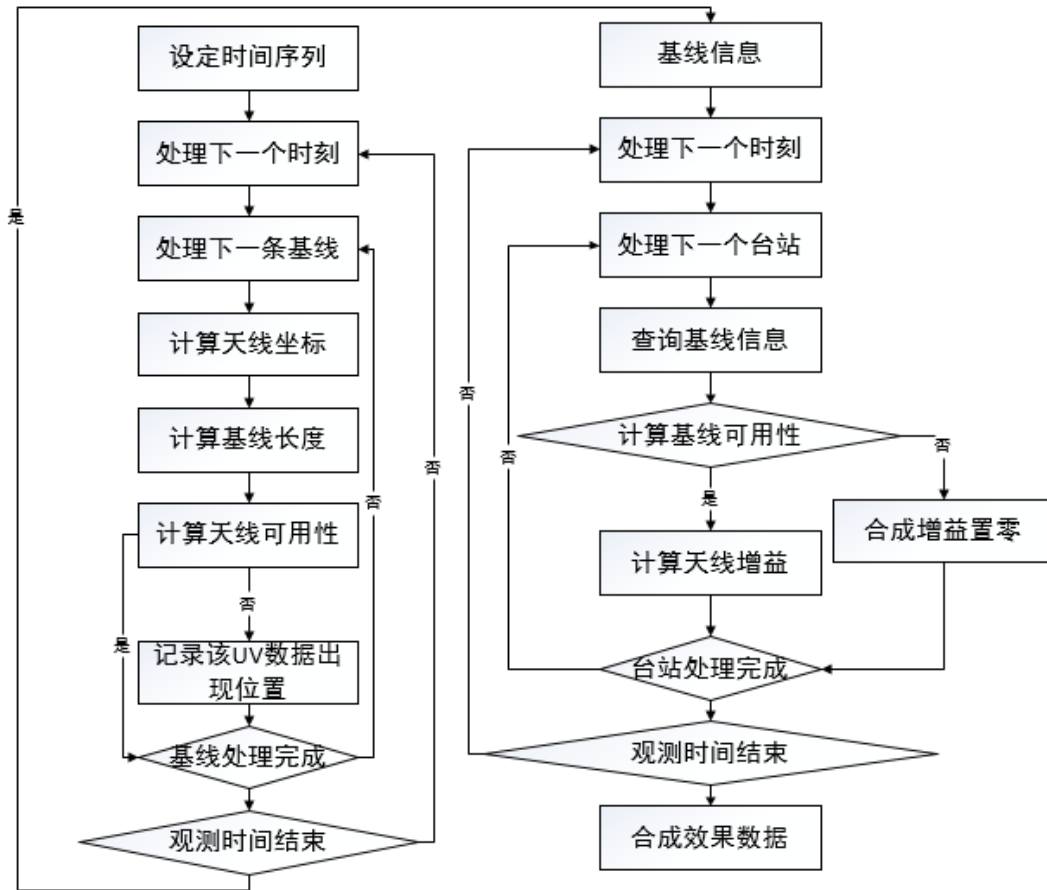
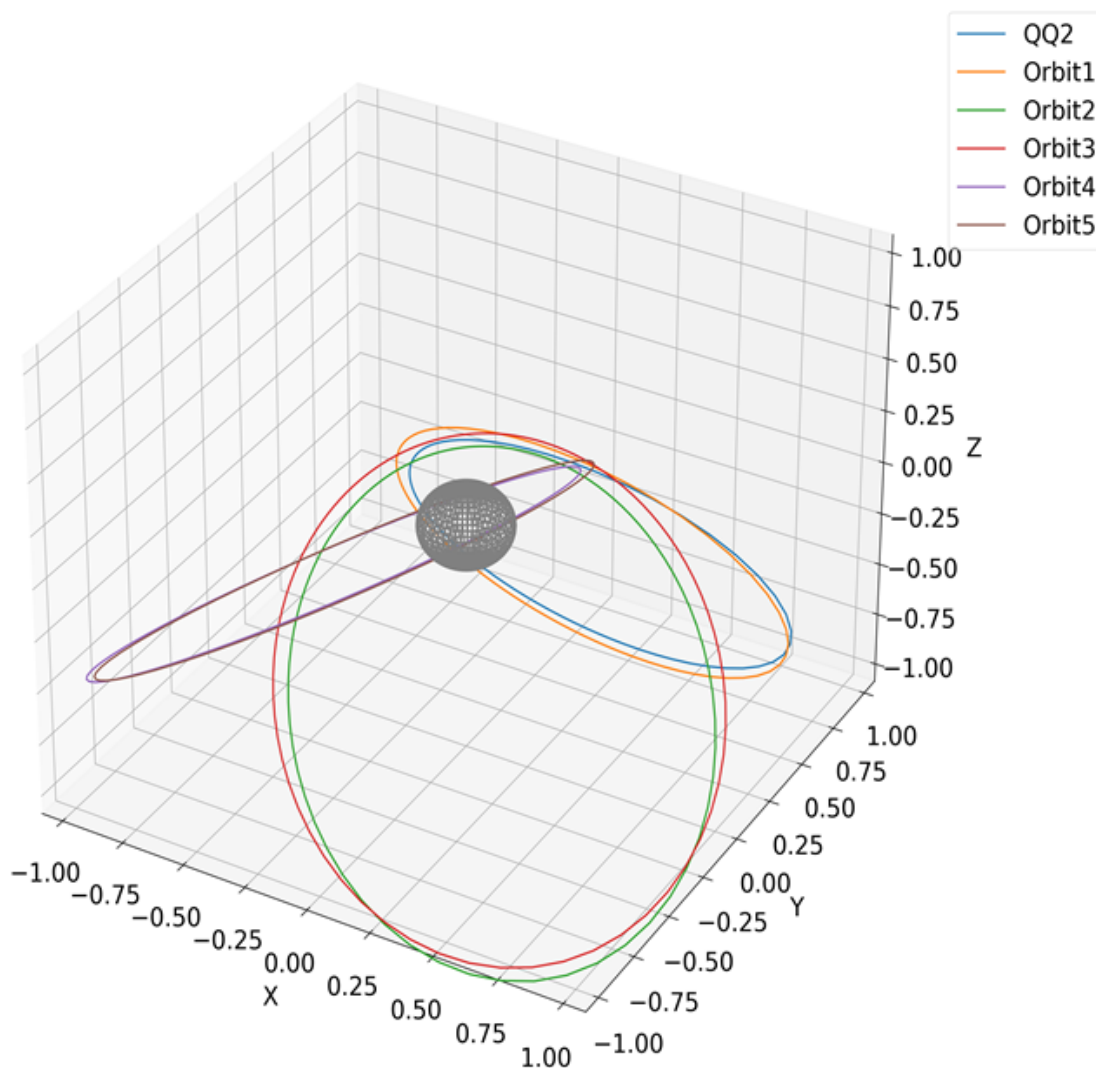


图 2 程序流程图

3 仿真结果分析

参考鹊桥二号卫星实际运行轨道,结合陈诗雨等人提出的近月空间星座轨道设计方案^[16],设置了如图 3 所示的六个轨道。并为每个轨道上搭载的模拟天线设置等效面积参数。以此作为测试轨道,利用程序进行仿真实验。



注: x,y,z 轴单位为月球半径

图 3 测试轨道三维视图

3.1 测试轨道设计及仿真结果

本工作采用 OmniUV^[22] 空地 VLBI 仿真工具包开展基线 uv 以及遮挡情况计算, 并在其基础上采用第 2.1、2.2 节中提出的算法计算每一时刻的等效合成面积。

OmniUV 工具包能够为每个参与天线合成的天线设置轨道参数、天线性能指标等数据, 并仿真出 uv 覆盖。如前文所述, uv 长度是计算天线合成效果所依赖的输入数据, 本文利用 OmniUV 生成轨道的 uv 数据, 经过处理得到 uv 长度并在此基础上开展仿真实验。

陈诗雨等人为了满足未来月球通信导航的需要, 实现对月球极区 100% 的一重覆盖率, 提出了至少需要 2 颗卫星, 部署在周期相同的轨道上, 且相位相差 180° 的星座设计方案^[16]。

本文以我国鹊桥通导遥星座项目为背景,进行天线合成效果评估的研究。参考鹊桥 2 号轨道以及陈诗雨等提出的星座设计方案,可在不同轨道共部署 6 颗卫星。每两个卫星为一组,分为三组。每组卫星的轨道位于同一平面,周期相同,相位设置为相差 180° 。轨道参数以及对六个天线的有效面积如表 1 所示,其中 01 号轨道为鹊桥二号的实测轨道:

表 1: 测试数据

半长轴单位 Rm 表示月球半径

编号	半长轴/(Rm)	偏心率	等效面积/(m^2)	升交点经度/($^\circ$)	真近点角/($^\circ$)
01	5.9	0.80	154	314	286
02	5.9	0.75	120	314	106
03	5.9	0.70	50	194	346
04	5.9	0.65	113	194	166
05	5.9	0.60	78	74	46
06	5.9	0.55	90	74	226

采用表一数据对程序进行测试,天线合成效果评估框架中的可调参数 k 暂时确定为 1。由于校正的原因,同样的空间天线阵以延展源和致密源作为目标源时的天线合成效果不一样。而点源作为目标源时,由于不具有延展结构,其源流量不会随 uv 长度的增加而下降,也就不会影响天线合成的校正。本工作在考虑 uv 长度导致校准下降的同时也考虑天线遮挡对天线合成的影响,而目标源为点源时,天线合成会受到天线遮挡的影响。因此,本工作在考虑致密源与延展源的基础上,研究点源的情况;分别讨论以类星体为代表的致密源、以星系为代表的延展源以及深空探测器信标为代表的点源作为目标源时,天线合成的结果。

由于只考虑天线间的 uv 平面基线长度 (uv 长度) 关系,因此六个天线每一时刻的空间构型可以抽象成一个拓扑图。每个天线代表图的节点,天线间的 uv 长度代表拓扑图上边的长度。对于任意边,当边两端的节点,也就是天线有一个以上因为遮挡等原因不可用时,该边的长度被记录为不可达。

目标源经纬度设置为 180° 、 30° 。为对于六个轨道组成的轨道构型,我们每间隔一分钟对轨道上的天线位置进行一次取样。持续取样 168h,可以获得 10080 组图。每个时刻的图作为输入,通过计算得出 10080 个时刻的天线合成等效面积,在致密源、延展源、点源这三种情况下的结果分别如图 4、5、6 所示。

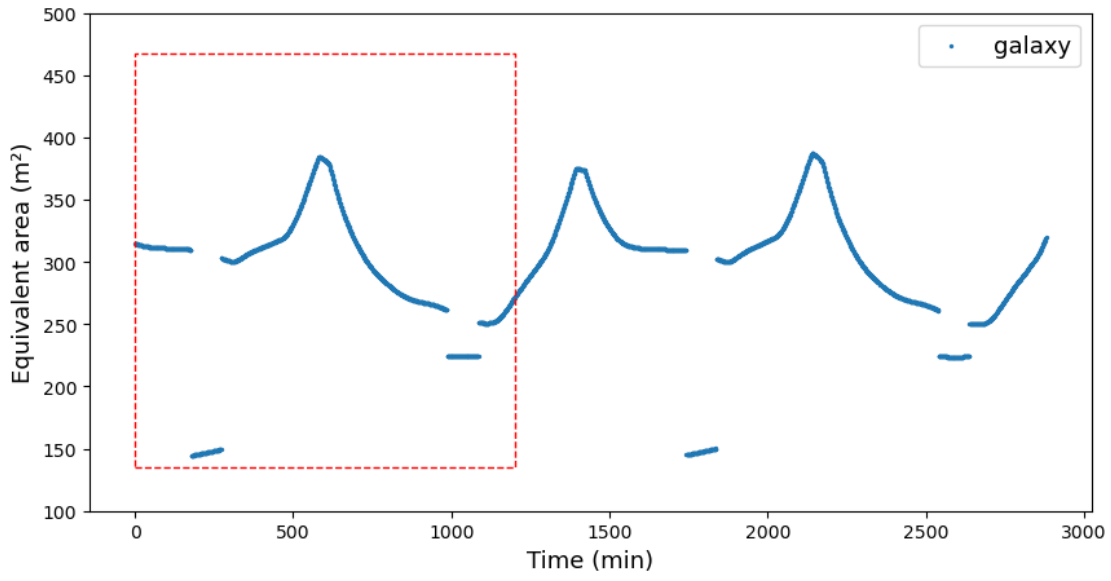


图 4 目标源为星系时等效面积随时间的变化

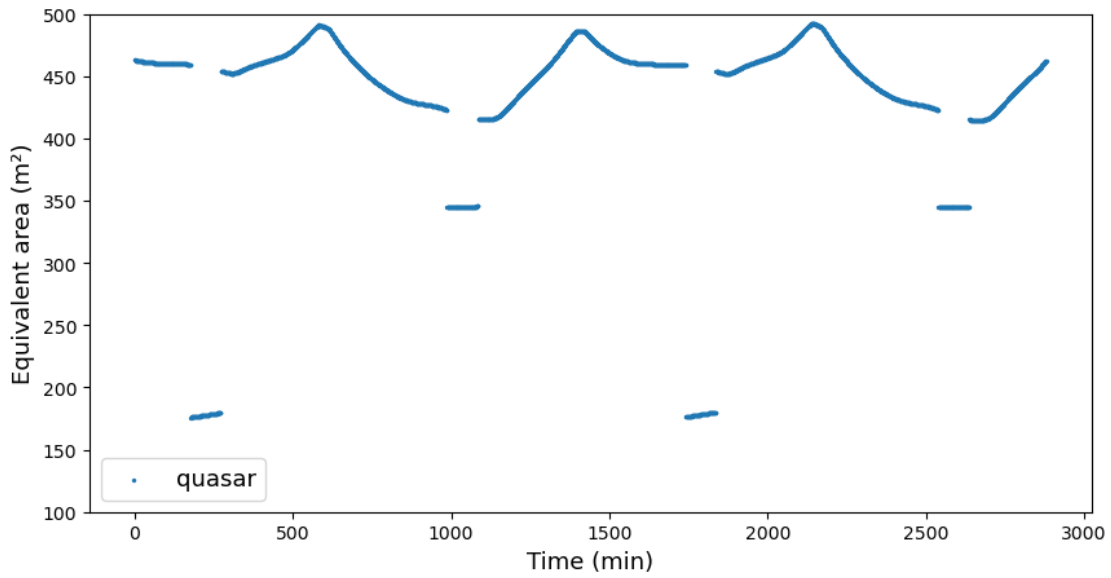


图 5 目标源为类星体时等效面积随时间的变化

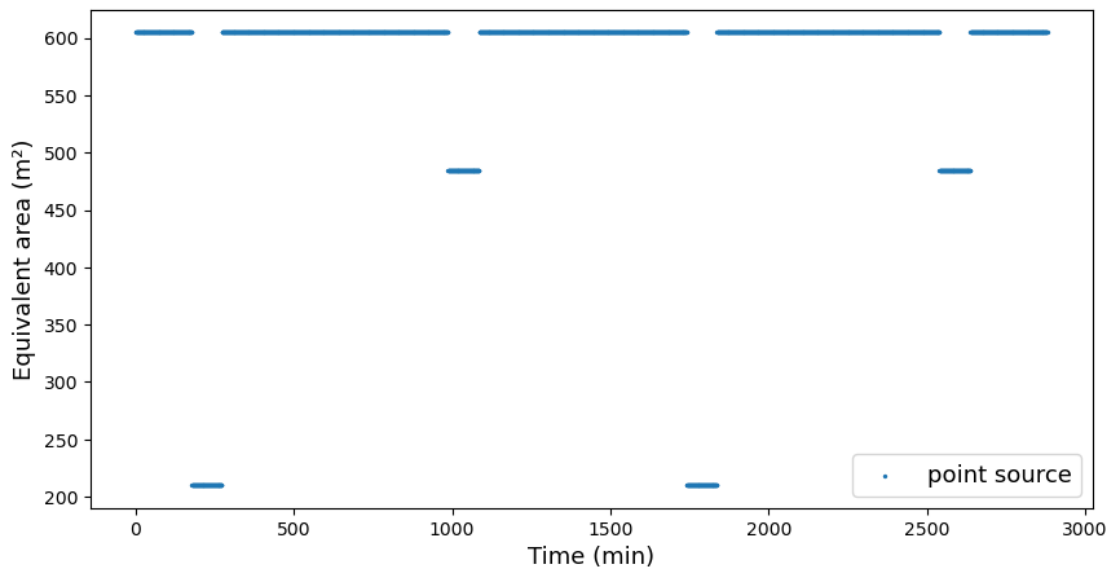


图 6 目标源为点源时等效面积随时间的变化

需要特别指出的是，当目标源为点源时，天线合成的校准不会因为源的延展结构而产生源被分解的情况，因此合成效率不会有损失。此时影响点源作为目标源时天线合成后天线等效面积的因素只有天线的可用性。当天线阵中有天线因遮挡等因素出现不可用的情况时，天线合成后的天线等效面积就会下降。

3.2 天线合成评估程序运行结果分析

对于星系类延展源的实验结果，我们截取前 1200 个采样点进行分析。如图 7 所示，选取的测试数据有 6 个天线，共有 5 条相对于基准天线的基线，采样间隔选取 1 分钟。对于任意基线，只要它对应的两个天线有任何一个被遮挡，该基线就不可用：

第一段曲线包含 178 分钟，通过分析原始数据得出前 178 分钟没有天线被遮挡；

第二段曲线包含 95 分钟，通过分析原始数据得出，在第 177 分钟到第 272 分钟基准天线被遮挡，导致其他台天线无法合成，为了尽可能获取更大的等效口径，算法会自动选取天线阵列中有效面积次大的天线作为基准天线，并计算天线合成后的等效面积；

第三段曲线包含 715 分钟，通过分析原始数据得出，在第 272 分钟到第 987 分钟被遮挡的天线恢复工作，天线合成基准天线也切换回口径最大的天线；

第四段曲线包含 99 分钟，通过分析原始数据得出，在第 987 分钟到第 1086 分钟 02 号天线被遮挡，天线合成等效面积失去其增益；

在第五段曲线的开始时间，02 号天线脱离被月球阻挡的状态，恢复正常工作。

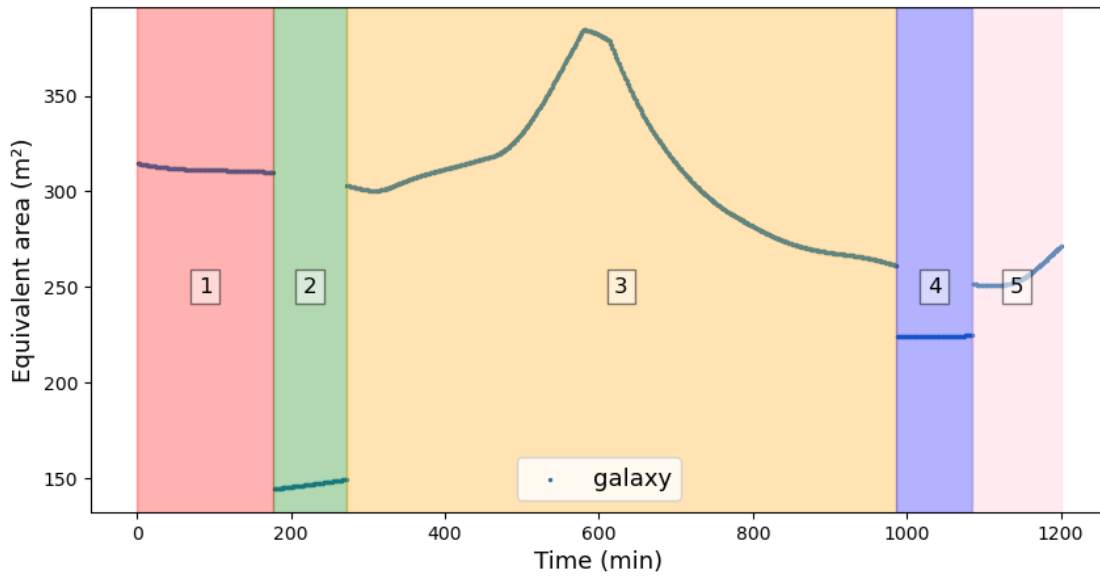


图 7 目标源为星系时等效面积随时间的变化 (截取前 1200 分钟)

以类星体为代表的致密源作为观测目标时, 合成后的天线等效面积随时间变化的原因与星系类似。当观测目标为致密源时, 由于它的结构更加致密, 长基线对校准的影响更小, 源被分解的幅度也更小。因此 uv 长度的变化对合成后的天线等效面积的影响也相对延展源更小。所以得出的合成结果曲线随时间变化的幅度也相对较小。曲线出现断点的原因与延展源的情况相同。当天线在轨道运行的过程中出现了遮挡等原因导致天线无法指向目标源时会使得天线进入暂时不可用的状态, 合成后的天线等效面积会在断点处下降。同样地, 当不可用的天线在轨道运行过程中可以再次指向目标源时, 它会重新恢复工作状态, 使合成后的天线等效面积在断点处上升。

深空探测器信标是点源。对它进行观测时, 不会出现源被分解等情况。因此 uv 长度的变化不会对合成后的天线等效面积造成影响。然而当参与合成的天线因为被中心天体遮挡而不可用时, 合成后的天线等效面积会失去不可用天线的有效面积。因此点源作为观测源时合成后的天线等效面积变化规律的图像也会出现断点。

3.3 多天区天线合成效果评估结果

本章的前两个小节详细分析了程序如何对天线合成效果进行评估。前文仅采用了经纬度分别为 180° 、 30° 的源进行分析, 为了考察观测多天区目标时程序对天线合成效果的评估能力, 我们将经度设置为 0° 、 90° , 纬度设置为 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$, 同样考虑目标源为点源、致密源、延展源的情况, 共获得 30 个不同的源作为观测目标。利用上述 30 个源代表不同天区, 得出观测这些源时程序对表一中天线合成效果的评估结果。本文选取其中经度为 0° 、纬度为 0° 、 45° 、 90° 的结果进行展示, 如图 8、9、10。

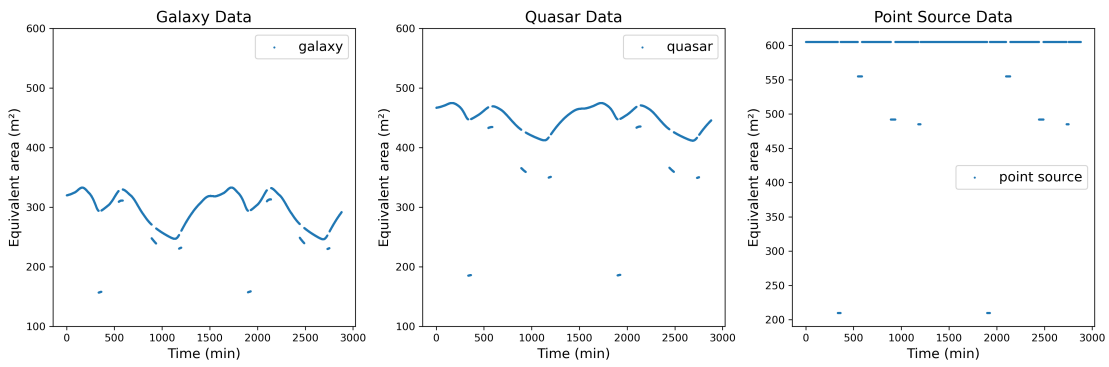


图 8 纬度 =0°、经度 =0° 时，三种目标源的天线合成效果评估结果

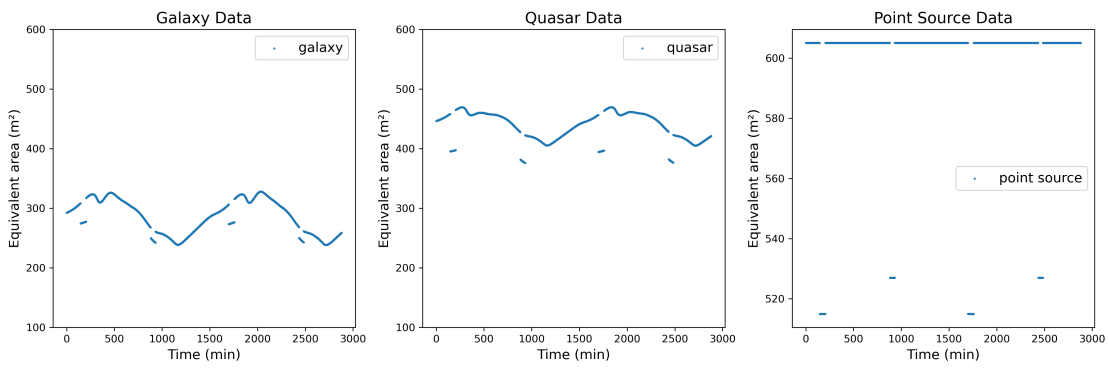


图 9 纬度 =0°、经度 =45° 时，三种目标源的天线合成效果评估结果

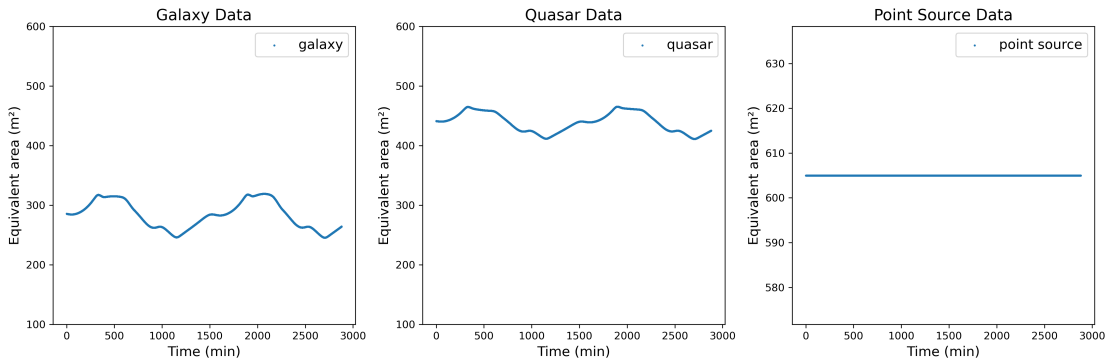


图 10 经度 =0°、纬度 =90° 时，三种目标源的天线合成效果评估结果

基于评估结果可以看出本方法对上述经纬度均适用。另外需要指出，本论文主要为评估方法的研究，并不针对某个特定的空间项目。

4 结论

本文基于我国正在论证的鹊桥通导遥星座, 提出了一种通过空间小口径抛物面天线合成等效大口径合成孔径天线的方法, 探讨了 uv 平面基线长度对地月空间射电综合孔径效果评估方法与基线长度对校正效果的影响, 并在此基础上对空间天线合成效率进行了建模。由于目标源的不同延展性会影响天线合成效果, 论文分析了当目标源为星系(弥散源)、类星体(致密源)和探测器(点源)时空间小口径抛物面天线的不同合成结果, 并设计出了相应的天线合成的评估算法。在此基础上, 参考鹊桥二号的轨道实测数据, 结合五个模拟轨道数据进行了仿真分析。结果表明, 该模型能够较好地预估空间小口径抛物面天线对不同类型目标源时的合成效率。

参考文献:

- [1] 李志辉, 张娟, 郑为民, 等. 用于地月空间 VLBI 的加权全频谱信号合成技术 [J]. 中国科学物理学·力学·天文学, 2023,53(5):128-138.
- [2] Hirosawa H, Hirabayashi H. VLBI Space Observatory Programme (VSOP) satellite. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 17-23, 1995,10(06):17-23.
- [3] 王帅, 刘思萌. 俄德联合 X 射线天文观测任务研究 [J]. 国际太空, 2019,(08):37-41.
- [4] Hong X, Shen Z, An T, et al. The Chinese Space Millimeter-wavelength VLBI Array - a step toward imaging the most compact astronomical objects[C]. 64th international astronomical congress, 2013.
- [5] 观天“巨眼”宇宙“向导”, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1784038806930663265&wfr=spider&for=pc>, 2023.
- [6] Y. MURATA, SPACE VLBI PROJECT[J]. *Journal of The Korean Astronomical Society*, 2005,6.
- [7] RIA Novosti. The RAS announced its interest in the project of the Russian space telescope [J]. 2021. <https://ria.ru/20211112/teleskop-1758251184.html>
- [8] Katherine Schauer, Danny Baird. LunaNet: Empowering Artemis with Communications and Navigation Interoperability. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/lunanet-empowering-artemis-with-communications-and-navigation-interoperability/>. 2021.
- [9] ESA launches Moonlight to establish lunar communications and navigation infrastructure. https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_launches_Moonlight_to_establish_lunar_communications_and_navigation_infrastructure, 2024.
- [10] Masaya Murata. Japan Lunar Navigation Satellite System (LNSS) and Its Contribution Towards ‘Moon GNSS’. https://bsgn.esa.int/wp-content/uploads/2024/02/06-Masaya_Murata_JAXA_presentation.pdf, 2024.
- [11] 国家航天局:正在论证构建环月球通信导航卫星星座. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1730956465599040763&wfr=spider&for=pc>, 2022.
- [12] 王晓宇. 鹊桥二号成功发射将建地月新“鹊桥”[J]. 国际太空, 2024(4):4-5.
- [13] 段学铭, 童力, 郑为民, 等. 基于 GPU 集群的空间 VLBI 射电源条纹搜索研究 [J]. 天文学进展, 2024,42(03):494-505.
- [14] Wang C, Jia Y, Xue C, et al. Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024,11(02):285-300.
- [15] 中国航天公布国际月球科研站详细计划. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1764154012850853143&wfr=spider&for=pc>, 2023.
- [16] 陈诗雨, 倪彦硕, 彭兢. 近月空间星座轨道设计方法 [J]. 中国空间科学技术 (中英文), 2024,44(03):15-29.
- [17] 杨孟飞, 彭兢, 李焯卉, 等. 地月空间基础设施体系架构与发展设想 [J]. 中国空间科学技术 (中英文), 2024,44(03):1-14.
- [18] KOVALEV Y Y, KELLERMANN K I, LISTER M L, et al. Sub-milliarcsecond imaging of quasars and active

- galactic nuclei. IV. Fine-scale structure[J]. The Astronomical journal,2005,130(6):2473-2505.
- [19] 何梦钊, 郑倩, 陕欢源, 等. 面向宇宙再电离探测的基本数据处理方法 [J]. 天文学进展, 2023,41(1):113-133.
- [20] 黎静. 天线增益自校准算法研究与实现 [D]. 广州大学, 2022.DOI:10.27040/d.cnki.ggzdu.2022.001593.
- [21] 樊敏, 胡小工, 李海涛, 等. 月球探测器 GNSS 信号可见性分析改进方法及应用 [J]. 航天器工程, 2022,31(2):19-28.
- [22] Liu L, Zheng W M, Fu J, et al. OmniUV: A Multipurpose Simulation Toolkit for VLBI Observation[J]. ASTRONOMICAL JOURNAL,2022,164(2).

A Baseline Length based Method for the Evaluation of Moon-Earth Radio Interferometric Aperture Synthesis Efficiency

LIU Chang^{1,2}, ZHENG Wei-min^{2,3,4}, LIU Lei^{2,3,4}, TONG Feng-xian^{2,3,4},
TONG Li^{2,3,4}, ZHANG Juan^{2,3,4}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology (Chinese Academy of Sciences), Beijing 100101, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Navigation and Positioning, Shanghai 200030, China;)

Abstract: China is planning to construct a lunar communication and navigation satellite constellation aimed at establishing comprehensive communication, remote sensing, and regional navigation capabilities on the Moon. This initiative will provide essential technical support for future deep space exploration missions. Additionally, there are plans to utilize the space antennas carried by these lunar satellites for conducting Very Long Baseline Interferometry (VLBI) observations in collaboration with ground stations. However, the small aperture of the space antennas poses limitations on their sensitivity due to the constraints of the space environment, which hampers the achievement of scientific objectives. To tackle this challenge, our research proposes the innovative idea of synthesizing multiple small-aperture antennas in space to create a larger aperture VLBI antenna, thereby enhancing the observational sensitivity for space VLBI. We begin by modeling the empirical relationship between the flux density of radio sources and the projected baseline length. Following this, we introduce an evaluation method to assess the synthesis effects of space antennas, supported by simulation experiments based on the planned orbits of the lunar communication and navigation constellation. The simulation results demonstrate that this evaluation method effectively quantifies the synthesis capabilities attainable by the space antenna array when observing radio sources of varying compactness under different orbital configurations. This provides valuable technical support for evaluating the synthesis effects in the subsequent design of space VLBI constellations.

Key words: space-VLBI; Antenna Synthesis; Self-Calibration; Baseline Efficiency