

## Возможные конфигурации орбиты наземно-космического радиointерферометра «Миллиметрон»

© А. Р. Шайхутдинов, А. Г. Рудницкий, С. Ф. Лихачев,  
В. И. Костенко, А. С. Андрианов

АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

В работе предложены возможные решения проблем, возникающих при выборе орбиты космического радиointерферометра. Также представлены результаты анализа текущего варианта орбиты наземно-космического радиointерферометра «Миллиметрон» с точки зрения наблюдений в режиме РСДБ. В заключении намечены дальнейшие пути поиска оптимальных конфигураций орбит наземно-космических радиointерферометров.

**Ключевые слова:** «Миллиметрон», космический радиотелескоп, наземно-космический радиointерферометр, радиointерферометрия со сверхдлинными базами, РСДБ, оптимальные конфигурации орбит.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.72-78>

### Введение

«Миллиметрон» — первый российский космический радиотелескоп (КРТ) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, который должен будет работать как в режиме одиночной антенны, так и в составе наземно-космического РСДБ-комплекса (в режиме КРСДБ).

В РСДБ качество изображения источника излучения зависит от заполнения UV-плоскости. Интерферометр измеряет функцию видности, аргументами которой являются пространственные частоты  $U$  и  $V$ . Изображение источника связано с функцией видности посредством двумерного Фурье-преобразования [1, стр. 128]. В общем случае равномерная плотность заполнения UV-плоскости обеспечивает наилучшее изображение источника.

В свою очередь, заполнение UV-плоскости полностью определяется конфигурацией радиointерферометра. В случае когда одно из плеч радиointерферометра находится на орбите, его конфигурация определяется орбитой КРТ. Поэтому для решения научных задач поиск оптимальной орбиты — важный вопрос, требующий решения.

В данной работе рассмотрены две практически значимые конфигурации орбит, чтобы понять, какая из них лучше подходит для проведения наблюдений в режиме КРСДБ.

## Орбита вокруг точки либрации L2

### *Гало-орбита*

На данный момент для КРТ выбрана гало-орбита [2] вокруг точки либрации L2 системы Солнце-Земля с характерным размером 1.5 млн км и периодом обращения 0.5 г. Точка либрации L2 находится на расстоянии 1.5 млн км на линии Солнце-Земля в противосолнечном направлении. Такой выбор орбиты снижает нагрузку на системы активного охлаждения КРТ. Глубокое охлаждение главного зеркала и приемной аппаратуры позволяют получить высокую чувствительность в режиме одиночной антенны. Более того, данная орбита позволяет в течение года пронаблюдать ~98.5 % всей небесной сферы с учетом того, что угол Солнце-«Миллиметрон»-источник должен быть больше  $100^\circ$ , чтобы не было засветки главного зеркала КРТ от Солнца.

Тем не менее гало-орбита имеет определенные сложности с проведением наблюдений в режиме КРСДБ. Для восстановления качественного изображения источника необходимо иметь информацию обо всех пространственных частотах, в противном случае будет проблематично получить восстановленное изображение в определенных масштабах [1, стр. 124]. Поэтому необходимо тщательно исследовать данную орбиту на наличие малых проекций баз.

### *Особенности проведения наблюдений*

При моделировании наблюдений в режиме КРСДБ необходимо учитывать две особенности:

1. Чтобы сохранить тепловой режим на КРТ, нельзя наблюдать полусферу, в которой находится Солнце. Это условие должно выполняться для любого типа орбит, однако в случае L2 оно является определяющим, так как орбита меняет свою ориентацию вместе с годичным движением Земли вокруг Солнца. В случае околоземной орбиты данное условие можно опустить, потому что в течение года всегда найдется время, когда источник будет в противоположенной полусфере.

2. «Миллиметрон» не выходит из эклиптики более, чем на  $30^\circ$ . Отсюда следует, что невозможно получить малые проекции баз для источников, которые имеют большие эклиптические широты. Как было написано выше, наличие малых баз является необходимым условием качественного восстановления изображений источников.

### *Пример заполнения UV-плоскости*

Типичное заполнение UV-плоскости, характерное для гало-орбиты, можно увидеть на примере галактики M87 (рис. 1, а). Стоит отметить, что малые проекции баз формально существуют. Однако в момент, когда проекция базы становится достаточно малой, источник находится в одной полусфере с Солнцем, т. е. становится ненаблюдаемым (рис. 1, б). Такая ситуация наблюдается практически для всех источников. Например, из списка целевых источников [3] всего лишь 19 % имеют проекции баз меньше 10 диаметров Земли.

Одним из лучших UV-заполнений можно считать заполнение для Sgr A\* (рис. 2).

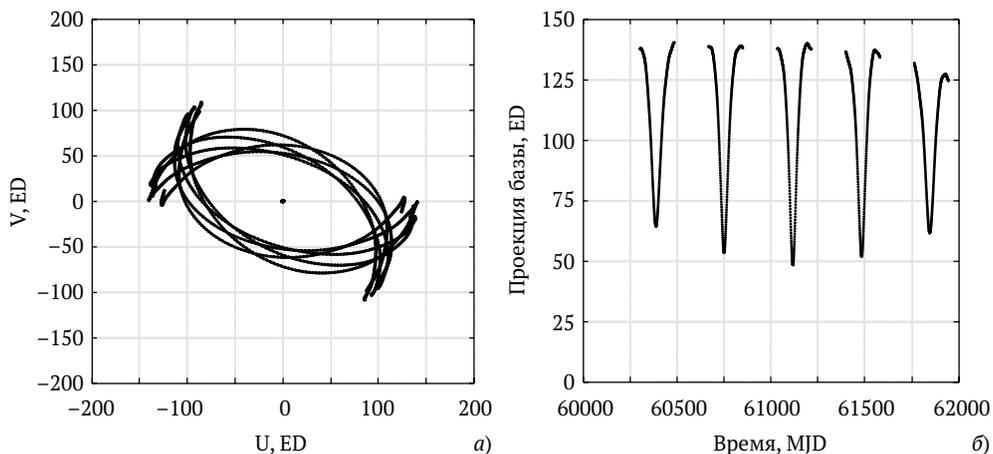


Рис. 1. *a* – заполнение UV-плоскости для M87 на сети ЕНТ [4] + «Миллиметрон»; *б* – проекция базы космического плеча; интервал времени – 5 лет

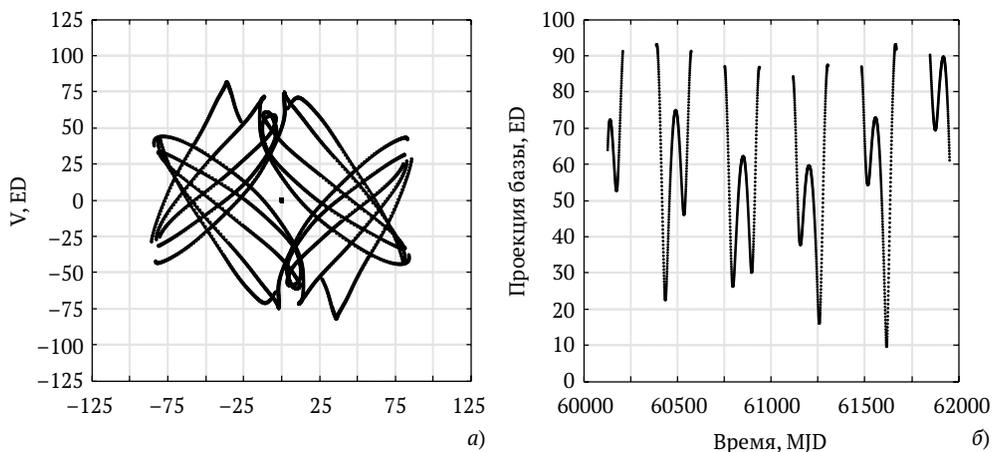


Рис. 2. *a* – заполнение UV-плоскости для Sgr A\* на сети ЕНТ [4] + «Миллиметрон»; *б* – проекция базы космического плеча; интервал времени – 5 лет

## Резюме

- Достоинства гало-орбиты:
  1. Хорошо подходит для наблюдений в режиме одиночной антенны.
  2. Все источники имеют большие проекции баз, вплоть до 140 диаметров Земли.
- Недостатки данной орбиты:
  1. Отсутствие малых баз у подавляющего большинства целевых источников. Более того, крайне сложно подобрать однородное заполнение UV-плоскости даже для одного источника.

2. Плохая эволюция заполнения UV-плоскости из-за периода орбиты, кратного периоду обращения Земли вокруг Солнца.

### *Другие варианты*

В поисках оптимальной орбиты можно рассмотреть следующие варианты.

Во-первых, исследовать другое семейство ограниченных орбит около L2 — орбиты Лиссажу [2]. Данный класс орбит обеспечит большую эволюцию баз интерферометра, однако из-за меньшего размера придется наложить еще большие ограничения на эклиптические широты источников.

Во-вторых, можно рассмотреть другие временные окна запуска КРТ «Миллиметронтрон». Это решение не меняет проекций базы, а лишь изменяет периоды видимости источников. Отсюда следует, что это решение не является универсальным и нельзя подобрать оптимальную орбиту для всего списка целевых источников. Более того, проблема малых проекций баз остается актуальной.

Наконец, можно рассмотреть сложную конфигурацию орбиты, которая состоит из трех компонент:

1. Гало-орбита, необходимая для проведения наблюдений в режиме одиночной антенны.

2. Околоземная орбита для проведения наблюдений в режиме КРСДБ.

3. Переходный участок между ними. Пример перелета с околоземной сильно эллиптической орбиты на орбиту около L2 с помощью гравитационного маневра можно найти в [5]. При этом затрачиваемый импульс на маневр не превышает 0.1 км/с.

В рамках данной работы рассмотрено проведение наблюдений в режиме КРСДБ на околоземных орбитах.

## **Орбита вокруг Земли**

### *Расчеты*

Все расчеты производились в программном обеспечении CELESTA, разработанным в АКЦ ФИАН. В ходе исследования осуществлялся перебор элементов орбит. При этом большая полуось орбиты варьировалась от 20 до 300 тыс. км, эксцентриситет — от 0 до 0.99, остальные элементы — во всем допустимом диапазоне. В качестве наземной РСДБ-сети также выбрана сеть ЕНТ [4].

В результате были получены следующие зависимости:

1. Большая полуось задает масштаб заполнения UV-плоскости.

2. Эксцентриситет отвечает за форму заполнения UV-плоскости и за взаимное расположение комплексно-сопряженных частей.

3. Наклон, долгота восходящего узла орбиты и аргумент перицентра определяют поворот заполнения UV-плоскости в пространстве относительно направления на источник.

Следовательно, подбирая элементы орбиты, можно получить для конкретного источника практически любое заполнение UV-плоскости, обеспечиваемое КРТ. Подобрать оптимальную орбиту сразу для нескольких источников сложнее, но в целом для околоземных орбит UV-заполнения получаются значительно лучше, чем для орбит около L2.

В качестве примера приведены построения для одной из лучших околоземных орбит для Sgr A\* с Кеплеровыми элементами орбиты  $a = 165$  тыс. км,  $e = 0.939$ ,  $i = 24.01$ ,  $\Omega = 356.41^\circ$ ,  $\omega = 268$ .

Все расчеты выполнены для наземно-космического интерферометра ЕНТ + «Миллиметр».

На рис. 3 приведены восстановленные изображения для Sgr A\* на частоте 230 ГГц, а на рис. 4 — заполнения UV-плоскостей.

*Пример заполнения UV-плоскости для Sgr A\**

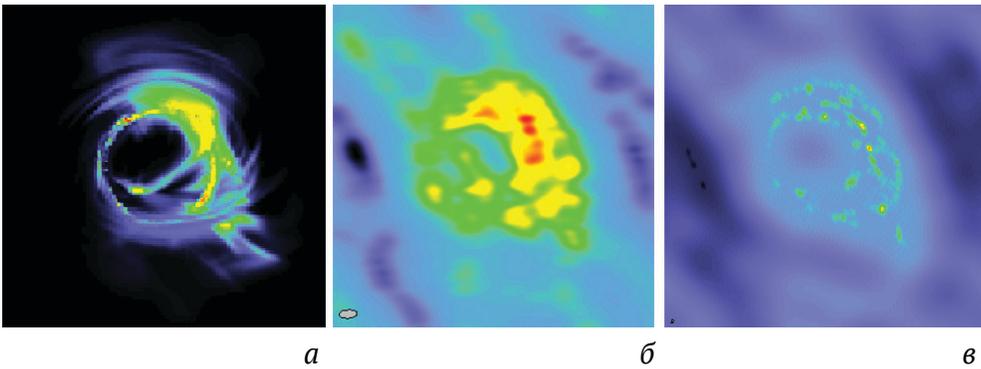


Рис. 3. Изображение Sgr A\*, 230 ГГц; *a* — модель [6]; *б* — изображение, соответствующее UV-заполнению на околоземной орбите; *в* — на орбите около L2; характерный размер Sgr A\* — 60  $\mu$ с

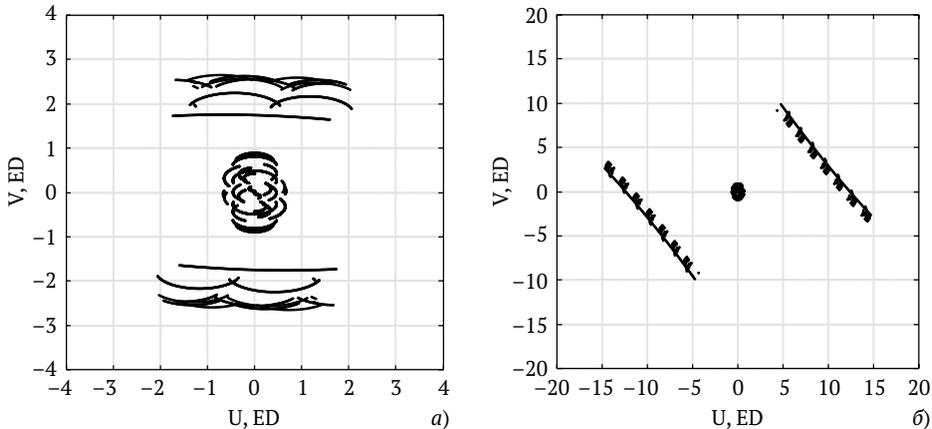


Рис. 4. *a* — заполнение UV-плоскости для Sgr A\* на околоземной орбите, интервал — 2 дня; *б* — лучшее заполнение для Sgr A\* на гало-орбите около L2; интервал — 7 дней (начиная с MJD = 61613.5)

## Резюме

Таким образом, основные отличия околоземной орбиты от гало-орбиты вокруг точки либрации L2 следующие:

1. Существуют трудности проведения наблюдений в режиме одиночной антенны, так как для сохранения теплового режима необходимо отворачивать КРТ сразу от трех небесных тел: Солнца, Земли и Луны. В случае гало-орбиты все эти тела находятся примерно на одной линии позади КРТ.
2. Значительно лучше обстоит ситуация в случае с малыми проекциями баз при наблюдениях в режиме КРСДБ по сравнению с орбитой около L2.
3. Нет сверхбольших баз (~100 ED).

## Заключение

В ходе анализа текущей гало-орбиты вокруг точки либрации L2 выявлены ее недостатки: плохая эволюция баз и отсутствие малых проекций баз для подавляющего большинства источников.

Предложено несколько возможных вариантов решения, которые можно объединить в две группы: изменение орбиты около L2 и рассмотрение варианта сложной конфигурации орбиты, состоящей из гало-орбиты (для наблюдений в режиме одиночной антенны) и околоземной орбиты (для наблюдений в режиме КРСДБ).

Показано, что с точки зрения равномерной плотности заполнения UV-плоскости околоземные орбиты имеют больший потенциал для проведения наблюдений в режиме КРСДБ, чем гало-орбиты вокруг точки либрации L2.

Более детальное описание данного проекта можно найти на официальном сайте [7].

## Литература

1. Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. — М.: Физматлит, 2003. — 624 с.
2. Aksenov S. A., Bober S. A. Calculation and Study of Limited Orbits around the L2 Libration Point of the Sun-Earth System // *Cosmic Research*. — 2018. — Vol. 56, no. 2. — P. 144–150.
3. Андрианов А. С., Костенко В. И., Лихачев С. Ф., Лукаш В. Н., Михеева Е. В. Перспективы проекта «Миллиметрон» в режиме РСДБ // 34 Конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 18–21 апреля, 2017: Тезисы докладов. — 2017. — С. 4.
4. Psaltis D., Narayan R., Fish V. L., Broderick A. E., Loeb A., Doeleman S. S. Event Horizon Telescope Evidence for Alignment of the Black Hole in the Center of the Milky Way with the Inner Stellar Disk // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 798, no 1. — 6 pp.
5. Kovalenko I., Esimont N. Final manoeuvre from highly elliptical orbit towards Lagrangian points // 15th International Conference on Space Operations (AIAA 2018-2673). — 2018. — P. 10.
6. Dexter J., Agol E., Fragile C. P., McKinney J. C. The Submillimeter Bump in Sgr A\* from Relativistic MHD Simulations // *Astrophys. J.* — 2010. — Vol. 717, no. 2. — P. 1092–1104.
7. Астрокосмический центр ФИАН Миллиметрон [Электронный ресурс]. — URL: <http://millimetron.ru/index.php/ru/> (дата обращения: 03.10.2018).

## On Orbital Configuration of Space-VLBI Mission “Millimetron”

A. R. Shaykhutdinov, A. G. Rudnitsky, S. F. Likhachev,  
V. I. Kostenko, A. S. Andrianov

“Millimetron” is the Russian space radio telescope (SRT) developed with the leading role of Astro Space Center of Lebedev Physical Institute. It will work in two different modes: as a high-sensitive single-dish antenna and as a part of ground-space radio interferometer. The paper proposes possible solutions to problems arising when choosing the orbit of a space radio interferometer. It also presents the results of the analysis for the current version of the orbit of the ground-based “Millimetron” radio interferometer on the observations in the VLBI mode. In conclusion, further ways to seek the optimal configurations of the orbits of ground-space radio interferometers are outlined.

**Keywords:** “Millimetron”, Space telescope, Ground-Space radiointerferometer, Space-VLBI, optimal orbital configuration.