

УДК 629.78

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЛО-ОРБИТЫ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ЛИБРАЦИИ L_2 СИСТЕМЫ СОЛНЦЕ–ЗЕМЛЯ ДЛЯ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОН

© 2020 г. А. Р. Шайхутдинов^{1,2,*}, В. И. Костенко¹¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, г. Москва, Россия

*chivelazur@gmail.com

Поступила в редакцию 07.06.2019 г.

После доработки 17.02.2020 г.

Принята к публикации 05.03.2020 г.

В работе произведен анализ возможности проведения РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) наблюдений на гало-орбите в окрестности точки либрации L_2 системы Солнце–(Земля + Луна). Эту орбиту предполагается использовать в наземно-космическом радиоинтерферометре Миллиметрон. Показано, что данная орбита обеспечивает медленную эволюцию UV -заполнений, а большинство источников не имеет малых проекций баз на протяжении всей миссии. Также выявлена проблема эффективного использования наблюдательного времени. Полученные результаты обобщаются на все семейство гало-орбит и на семейство орбит Лиссажу.

DOI: 10.31857/S002342062005009X

ВВЕДЕНИЕ

В Астрокосмическом центре ФИАН ведется активная работа над созданием космического радио телескопа (КРТ) *Спектр-М* проекта Миллиметрон [1]. *Спектр-М* будет проводить научные наблюдения в двух режимах: режим одиночной антенны и режим космического радиоинтерферометра со сверхдлинными базами (КРСДБ). Десятиметровое главное зеркало состоит из 24 лепестков, выполненных из высокомодульного углеродного пластика. Рабочий диапазон длин волн для режима одиночной антенны — от 0.05 до 3 мм, а для режима КРСДБ — от 1 до 17 мм.

Спектр научных задач, которые будет решать Миллиметрон, охватывает все масштабы Вселенной: от изучения протопланетных дисков в Галактике до исследования тонких космологических эффектов [2]. Приоритетной научной задачей в режиме КРСДБ является построение изображений (под изображением здесь и далее подразумевается интенсивность) теней сверхмассивных черных дыр (СМЧД), таких как Sgr A*, M87, OJ287 и др.

Для обеспечения сверхвысокой чувствительности в одиночном режиме КРТ будет снабжен системами активного и пассивного охлаждения, которые позволят охладить главное зеркало телескопа до 20 К, а приемники излучения — до 4 К.

В качестве номинальной орбиты *Спектр-М* изначально предполагалось использовать высокую эллиптическую околоземную орбиту [3]. Но дальнейшая работа над проектом показала, что невозможно удовлетворить требованиям системы обеспечения теплового режима (СОТР) КА на околоземных орбитах из-за неизбежной засветки главного зеркала Луной, Землей и Солнцем. Поэтому сейчас требования технического задания (ТЗ) таковы, что орбита космической обсерватории должна размещаться в окрестностях точки либрации L_2 системы Солнце–(Земля + Луна).

Точка либрации L_2 является одной из пяти динамических точек, которые появляются в решении ограниченной задачи трех тел [4]. Она находится в 1.5 млн км. от Земли на линии Земля–Солнце в противосолнечном направлении. В окрестности данной точки либрации существуют ограниченные периодические орбиты [5]. Для *Спектр-М* выбрана орбита из семейства гало-орбит [6].

На рис. 1 изображены проекции гало-орбиты *Спектр-М* в системе координат, связанной с точкой либрации L_2 . Начало этой системы находится в L_2 , ось X направлена в сторону барицентра системы Земля–Луна, ось Z — в северный полюс эклиптики, а ось Y дополняет их до правой тройки. У гало-орбит период колебаний вдоль каждой оси равен примерно половине года. Характерный раз-

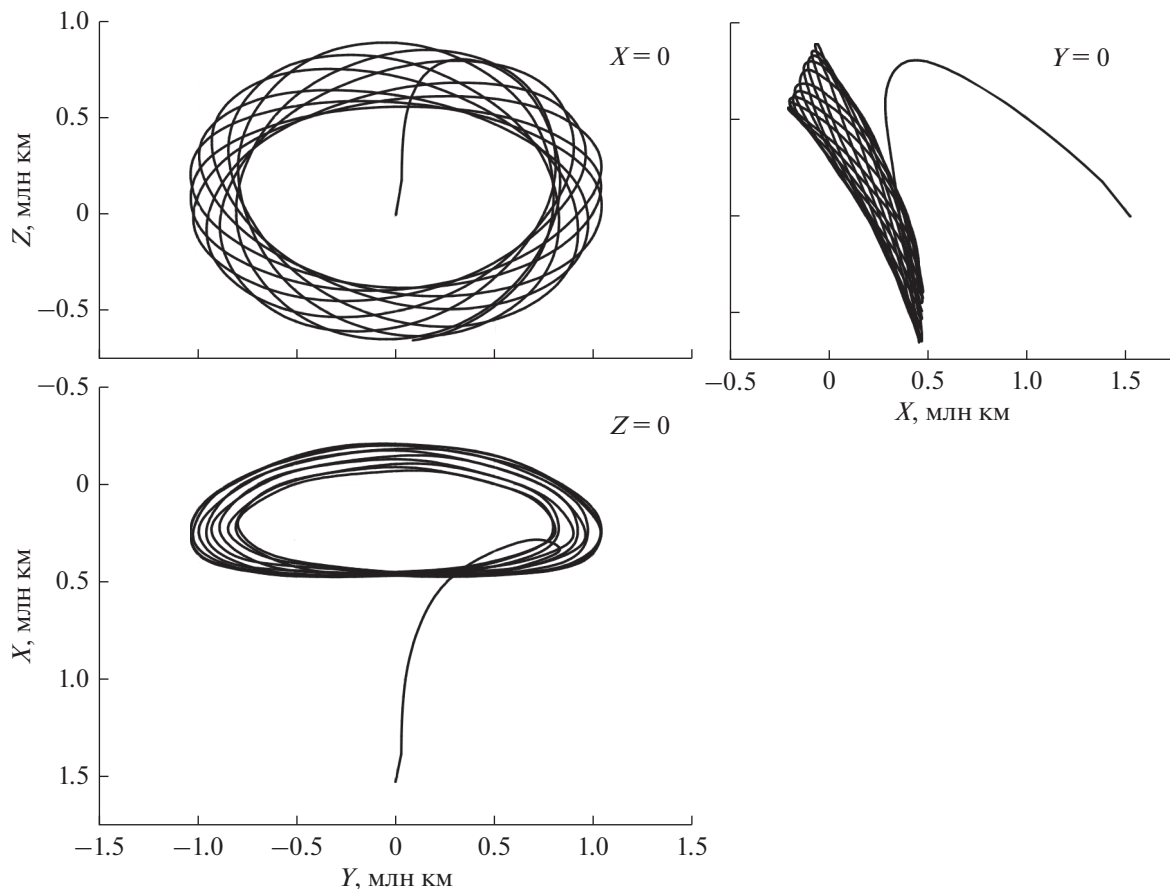


Рис. 1. Проекция гало-орбиты *Спектр-М* в системе координат, связанной с L_2 . Начало системы находится в L_2 . Ось X направлена в сторону Земли, ось Z – в северный полюс эклиптики, ось Y дополняет их до правой тройки. Интервал построения – 5 лет.

мер орбиты – 1.5 млн км. Интервал построения – 5 лет, начиная с 01.VII.2023.

Помимо того, что гало-орбита удовлетворяет требованиям СОТР, на ней реализуются условия видимости, позволяющие в течение года пронаблюдать 100% небесной сферы. Она обеспечивает сверхбольшие базы интерферометра (вплоть до 140 диаметров Земли) для всех целевых источников, включая все источники каталога из работы [7]. Такие проекции базы необходимы для получения сверхвысокого углового разрешения, достигающего десятых долей мкс дуги на длине волны 1 мм. Однако для восстановления качественного изображения источника необходимо иметь спектр пространственных частот, который включает в себя не только большие, но и малые проекции баз. Большие пустоты в UV -заполнении, которые могут возникнуть в случае наземно-космических РСДБ сетей, существенно урезают динамический диапазон получаемых изображений, тем самым значительно уменьшая вклад космического плеча радиоинтерферометра [8]. Поэтому при проектировании РСДБ сетей стараются минимизировать расстояние между треками на UV -плоскости [9].

Аналогичный вопрос рассматривался и в проекте *РадиоАстрон*, запуск которого состоялся 18.VII.2011. Выбор орбиты *РадиоАстрона* производился с помощью критерия, в котором больший вес присваивался меньшим проекциям баз [10].

Таким образом, чтобы добиться максимальной эффективности Миллиметрона в режиме КРСДБ, необходимо иметь не только большие, но и малые проекции баз. Если с большими проекциями базы на гало-орбите проблем нет, то наличие малых проекций не так очевидно.

ПРИМЕРЫ UV -ЗАПОЛНЕНИЙ НА ГАЛО-ОРБИТЕ

Существуют две важные особенности наблюдений на гало-орбите.

Первая особенность определяется техническим ограничением со стороны СОТР КРТ: невозможно наблюдать полусферу, в вершине которой находится Солнце. Это значит, что *Спектр-М* всегда смотрит “от Солнца” (рис. 2).

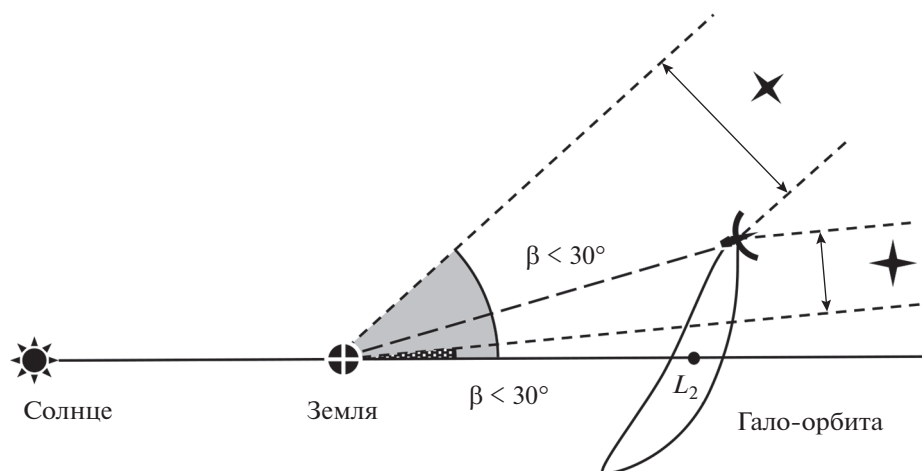


Рис. 2. Схема проведения КРСДБ наблюдений на гало-орбите. Углом β отмечены эклиптические широты источников излучения.

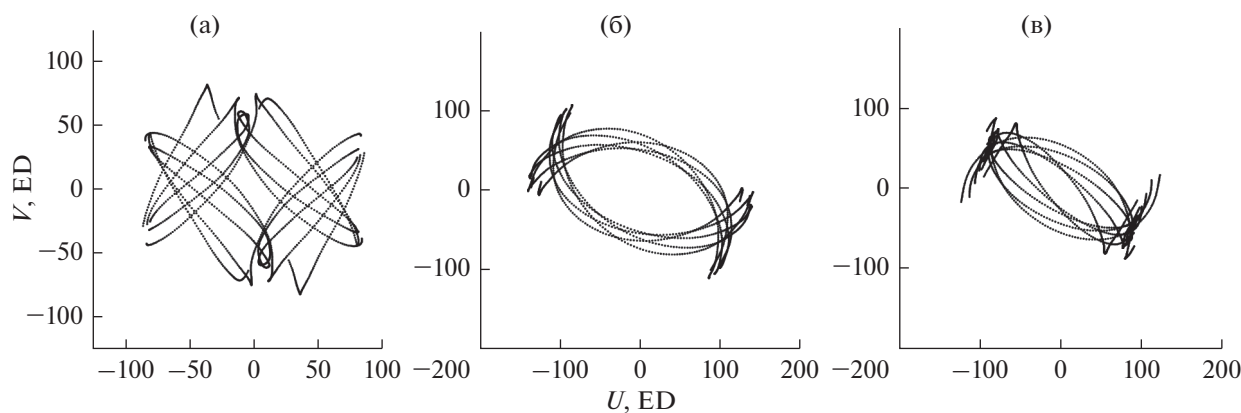


Рис. 3. Примеры UV-заполнений на гало-орбите, рассчитанных на интервале времени 5 лет. а) для Sgr A*, б) для M87, в) для OJ287.

Вторая особенность связана с выходом КРТ из плоскости эклиптики и характерна для любых ограниченных орбит около L_2 . Например, если КРТ выходит из плоскости эклиптики не более, чем на 30° , то невозможно получить малые проекции базы до нескольких диаметров Земли (ED) для всех источников, эклиптическая широта которых больше 30° (рис. 2). При этом небольшая эклиптическая широта источника является необходимым, но не достаточным условием наличия малых проекций баз.

Ниже приведены примеры заполнения UV-плоскостей для Sgr A* (рис. 3а) и M87 (рис. 3б), которые можно получить на гало-орбите за 5 лет. В качестве наземного сегмента интерферометра использовался фиктивный телескоп, находящийся в геоцентре. Условия видимости источника на наземном телескопе не учитывались, чтобы исключить его влияние на форму UV-заполнения. Для КРТ использовалось ограничение согласно

требованиям СОТР, поэтому на графике модуля базы для Sgr A* отчетливо видны периодические полугодовые провалы, соответствующие интервалам времени, в течение которых источник находится в одной полусфере с Солнцем вне зоны видимости телескопа (рис. 4).

UV-заполнение для Sgr A* является одним из лучших для гало-орбиты среди всех источников предварительного каталога (рис. 3а). Тем не менее, даже в этом случае продолжительность окна, в течение которого реализуются малые проекции базы до 10 ED, составляет всего несколько суток. Существует только одно такое окно на протяжении всей миссии (рис. 4). В принципе, можно подобрать орбиту так, чтобы окно появлялось раз в год, но не чаще. Типичное же заполнение UV-плоскости, которое получается для большинства источников на гало-орбите, имеет огромную пустоту в районе околоземных баз и больше похоже на заполнение для M87 (рис. 3б).

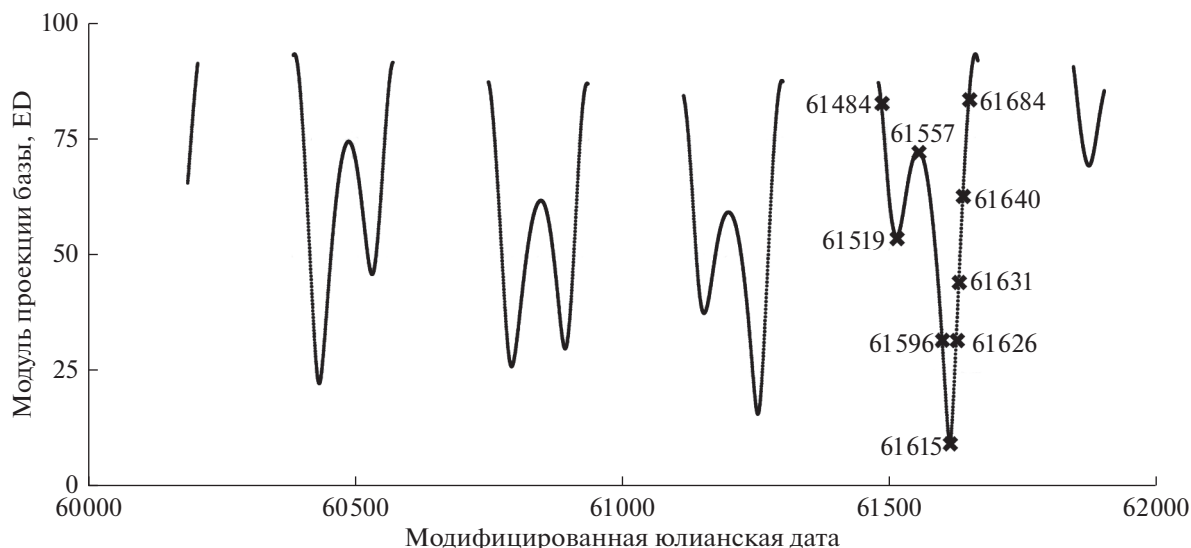


Рис. 4. Модуль проекции базы для Sgr A*, рассчитанный на интервале времени 5 лет. Числами на графике отмечены модифицированные юлианские даты, для которых построены *UV*-заполнения на рис. 5.

UV-заполнение, построенное на пятилетнем интервале времени показывает общую картину на гало-орбите. Реально же восстанавливать изображение имеет смысл по *UV*-заполнению, построенному максимум за несколько суток. На рис. 5 показаны примеры заполнений для Sgr A*, полученных на протяжении 7 сут. В качестве наземной РСДБ сети выбрана сеть Event Horizon Telescope в составе на 2018 год [11].

Из рис. 5 видно, что характерный вид *UV*-заполнений за время сеанса — это три точки, лежащие на одной прямой и удаленные друг от друга на расстояние порядка 20–50 ED. Такая низкая эволюция *UV*-заполнений, получаемых на гало-орбите, характерна для всех источников. Это объясняется тем, что КРТ находится в среднем в 1.5 млн км от Земли, а его скорость относительно геоцентра не превышает 1 км/с. Получается, что за время сеанса наблюдения проводятся на неподвижном в пространстве двухэлементном интерферометре КРТ-геоцентр, а эволюция *UV*-заполнения происходит на малых масштабах порядка диаметра Земли благодаря наземным базам интерферометра.

Таким образом, первый недостаток гало-орбиты — это слабая эволюция *UV*-заполнений для всех источников, обусловленная динамикой движения КРТ по гало-орбите и его большой удаленностью от Земли.

В редких случаях для небольшого числа источников благодаря эффекту проекции можно получить *UV*-заполнение, схожее с лучшим *UV*-заполнением для Sgr A* (модифицированная юлианская дата 61615 на рис. 5). Однако даже в таком случае эволюции *UV*-заполнения все равно недо-

статочно, что прямым образом влияет на качество восстановленного изображения [12].

ПРОЕКЦИЯ МОЛЬВЕЙДЕ

Дальнейший анализ гало-орбиты удобно проводить с помощью проекции Мольвейде [13]. В принципе, подойдет любая другая наглядная проекция. Основное достоинство проекции Мольвейде заключается в том, что она не искажает площадей и сохраняет единый масштаб, т.е. является равновеликой.

На рис. 6 изображена геоцентрическая эклиптическая проекция Мольвейде и трек *Спектр-М*, построенный на протяжении 5 лет (годограф вектора геоцентр-КРТ). Треугольниками отмечены источники, которые представляют интерес для режима КРСДБ. Отдельно выделены Sgr A* и M87.

Как уже было сказано ранее, КРТ не может наблюдать полусферу, в вершине которой находится Солнце, а точка либрации L_2 удалена от Земли на 1.5 млн км (рис. 2). Это значит, что источники, которые лежат вдали от трека *Спектр-М* на проекции Мольвейде, не могут иметь малых проекций баз на протяжении всей миссии (рис. 6). Действительно, отклонение в 0.5° от трека приводит к увеличению минимальной проекции базы примерно на 1 ED. Данный вывод хорошо иллюстрируют уже рассмотренные примеры *UV*-заполнений. Sgr A* лежит вблизи трека, и для него существуют малые проекции баз (рис. 3а). OJ287 находится всего лишь в нескольких градусах от трека, однако для него уже нет малых проекций баз (рис. 3в). А для M87, находящегося примерно в

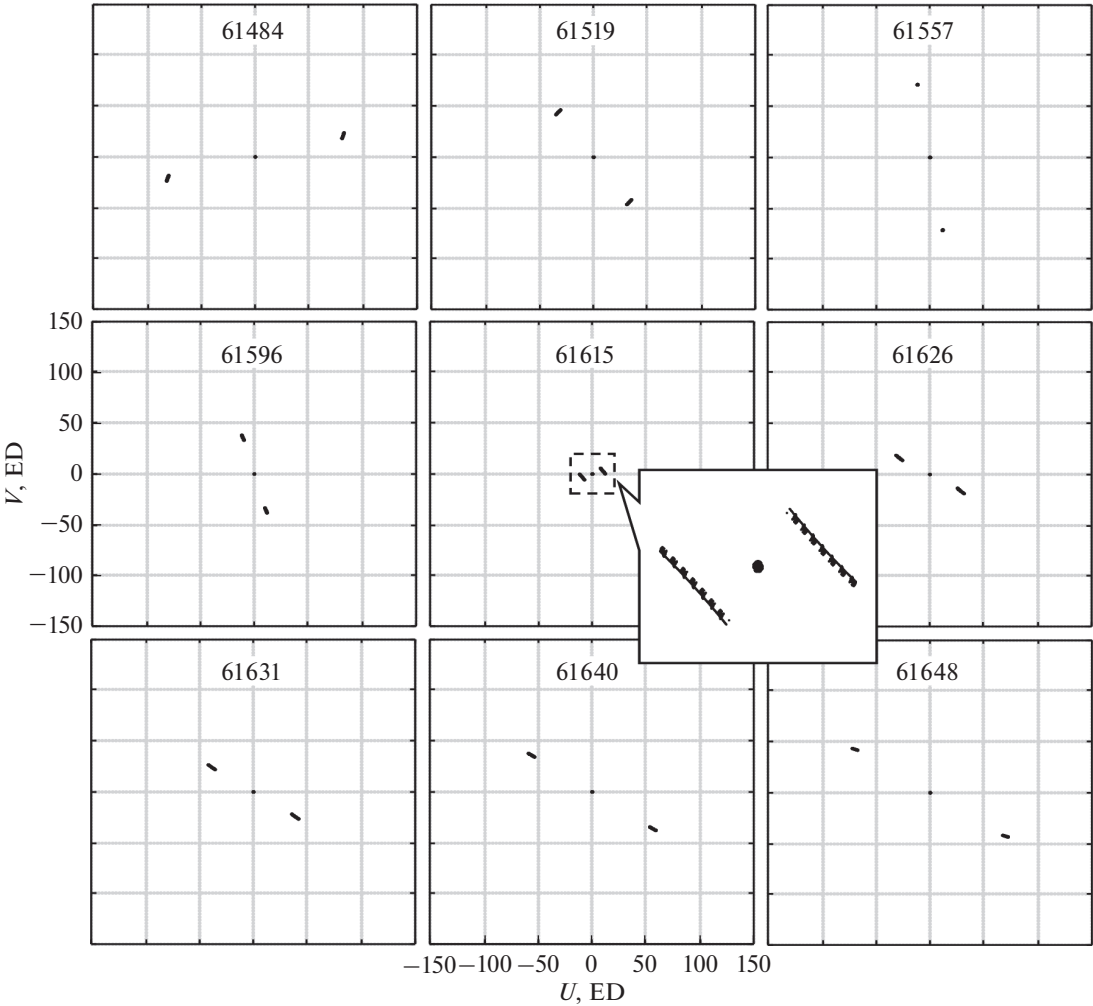


Рис. 5. Эволюция UV -заполнения для Sgr A*. Каждое UV -заполнение рассчитано на интервале времени 7 сут, начиная с модифицированной юлианской даты, указанной вверху каждого UV -заполнения.

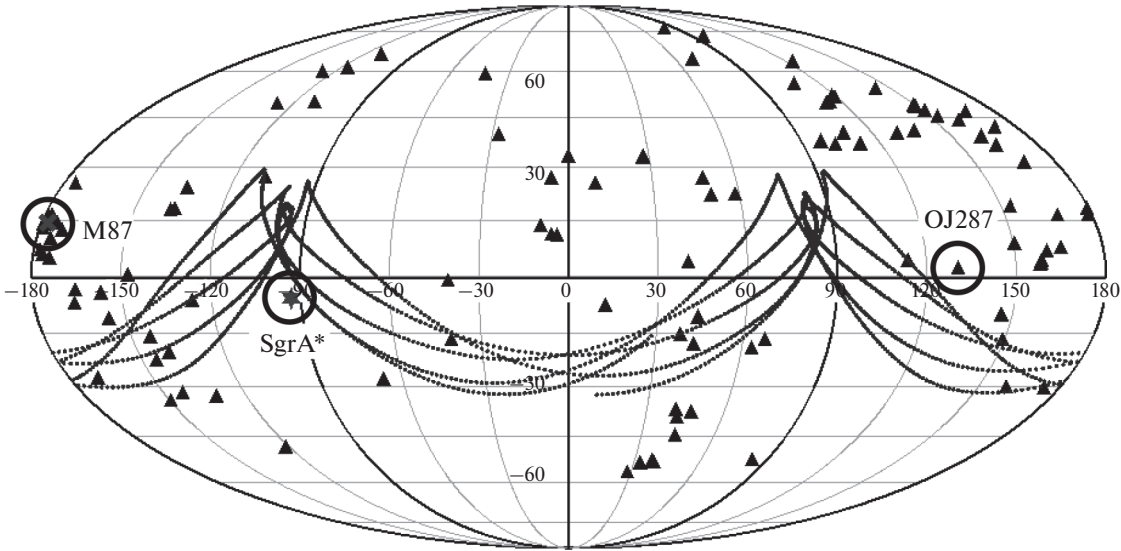


Рис. 6. Геоцентрическая эклиптическая проекция Мольвейде. На проекции изображен трек *Спектр-М* за 5 лет и источники из предварительного каталога в виде треугольников.

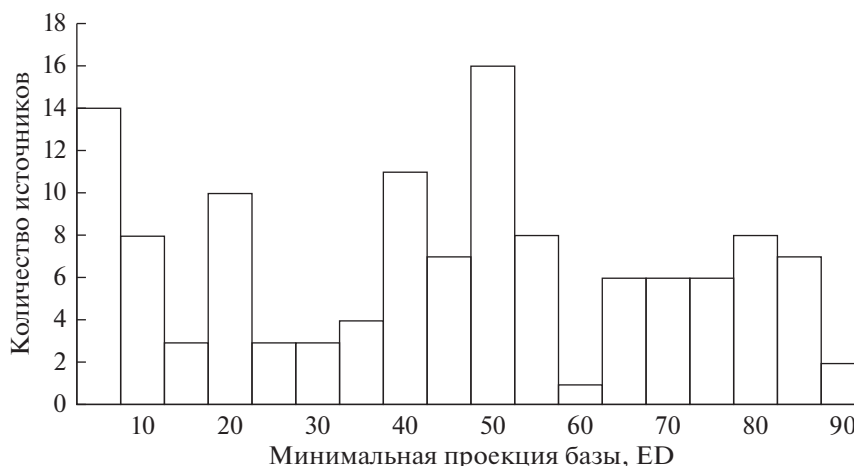


Рис. 7. Распределение источников предварительного каталога по минимальной проекции базы для гало-орбиты *Спектр-М*.

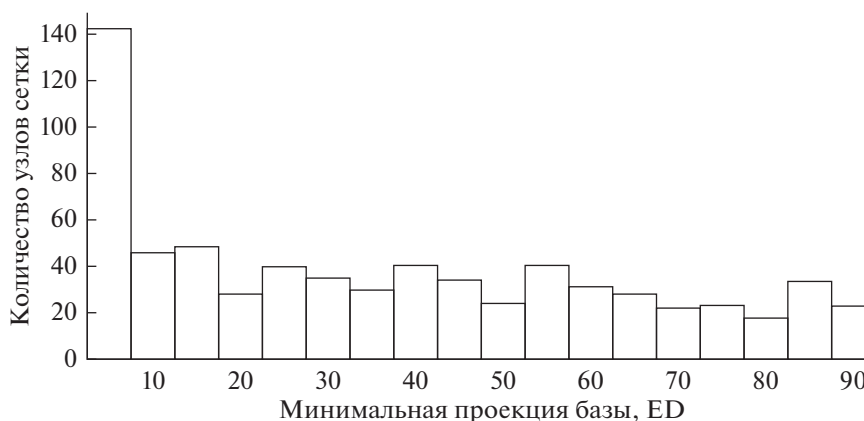


Рис. 8. Распределение узлов равновеликой сетки небесной сферы по минимальной проекции базы для гало-орбиты *Спектр-М*.

30-и градусах от трека, нет ни одной проекции базы до 50 ED (рис. 36).

Распределение источников по минимальной проекции базы, которую можно получить для каждого из них за все время миссии (рис. 7), подтверждает качественные выводы, сделанные из проекции Мольвейде. Только 14 из 123 источников имеют малые проекции баз до 5 ED. Фактически, это означает, что для 88% источников будет невозможно восстановить изображения надлежащего качества.

Можно рассмотреть статистику для равновеликой сетки небесной сферы, не привязываясь к конкретному каталогу источников: по долготе деление равномерное с шагом в 10° , а по широте — неравномерное с границами $\arcsin(1 - j/10)$, $j = \overline{1, 19}$, плюс две полярные точки (всего 686 узлов). Из распределения узлов такой сетки по минимальной проекции базы следует, что всего лишь 20%

небесной сферы имеет проекции меньше 5 ED (рис. 8). Таким образом, даже если получится расширить каталог целевых источников (что сделать крайне сложно из-за ограничений по чувствительности), статистика минимальных проекций баз изменится незначительно.

Следовательно, второй недостаток гало-орбиты для режима КРСДБ — это бедная статистика малых проекций баз, вследствие которой подавляющее большинство источников имеют неоднородные UV -заполнения с большими пустотами.

Возвращаясь к проекции Мольвейде, можно заключить, что если увеличить размах трека вдоль эклиптики, то покрытие малыми проекциями баз улучшится. Однако динамика движения около L_2 такова, что у всех гало-орбит период колебаний вдоль оси Z равен примерно половине года [14]. Это значит, что узлы разворота, где скорость вдоль оси Z меняет знак, локализованы в двух об-

Таблица 1. Интервалы времени, в течение которых ни для одного целевого источника нет проекций баз меньше 20 ED

Начало	Конец	Продолжительность, сутки
1.VII.2023	5.IX.2023	66
16.IX.2023	8.X.2023	22
1.XI.2023	9.II.2024	100
28.II.2024	2.III.2024	3
11.IV.2024	31.VIII.2024	142
10.IX.2024	1.X.2024	21
25.X.2024	11.II.2025	109
22.II.2025	24.II.2025	2
27.II.2025	1.III.2025	2
14.IV.2025	31.VIII.2025	139
9.IX.2025	26.IX.2025	17
10.X.2025	2.III.2026	143
13.IV.2026	29.VII.2026	107
10.VIII.2026	30.VIII.2026	20
9.IX.2026	20.IX.2026	11
9.X.2026	1.III.2027	143
11.IV.2027	22.VII.2027	102
6.VIII.2027	17.VIII.2027	11
25.VIII.2027	29.VIII.2027	4
2.IX.2027	25.IX.2027	23
11.X.2027	25.X.2027	14
29.X.2027	26.II.2028	120
7.IV.2028	30.IV.2028	23

ластях ($\pm 90^\circ$ по эклиптической долготе), а трек из года в год практически полностью повторяется (рис. 6).

Локальным решением может быть перенос всего трека вдоль эклиптики так, чтобы узлы разворота оказались в области наибольшей концентрации источников. Этого можно добиться путем изменения момента старта КРТ. Однако при смещении узлов вдоль эклиптики ухудшаются условия радиовидимости с северных широт, что важно в случае режима КРСДБ, потому что для передачи данных, полученных за несколько часов наблюдений в режиме КРСДБ, требуются практически целые сутки. Поэтому, рассматривать перенос всего трека вдоль эклиптики нецелесообразно с точки зрения навигации КРТ.

Дополнительная трудность возникает в процессе оптимизации наблюдений. После отработки режима одиночной антенны в течение 3 лет, наблюдения будут проводиться только в режиме

КРСДБ (не менее 7 лет), и нужно максимально эффективно использовать наблюдательное время.

Однако расчеты показывают, что существует множество интервалов времени, когда малых проекций баз нет ни для одного источника предварительного каталога (табл. 1). В течение 1320 сут за 5 лет ни один из источников не имеет проекции баз меньше 20 ED. И всего лишь в течение 48 сут за 5 лет можно проводить наблюдения источников на проекциях базы меньше 5 ED. Аналогичная картина наблюдается и на всем интервале миссии порядка 10 лет: примерно 70% времени ни у одного источника предварительного каталога нет проекций баз до 20 ED.

Из таблицы видно, что наибольшие интервалы времени, в течение которых нет малых проекций баз, появляются с периодичностью полгода и могут достигать нескольких месяцев. Эти интервалы соответствуют прохождению КРТ южного полюса гало-орбиты. Действительно, на проекции Мольвейде практически нет источников возле участков трека на эклиптических широтах порядка -30° (рис. 6). При этом, как уже было отмечено ранее, существенно увеличить количество целевых источников нельзя из-за ограничений по чувствительности. Поэтому суммарное время наблюдений, в течение которого можно получать малые проекции базы, а значит, и хорошие UV-заполнения, составляет малую долю от времени всей миссии.

Отсюда следует третий недостаток гало-орбиты — проблемы с эффективным использованием наблюдательного времени.

ОРБИТЫ ЛИССАЖУ

Полученные результаты можно обобщить и на орбиты Лиссажу — это другое семейство ограниченных орбит около L_2 , которые используются на практике [15]. У этих орбит амплитуда колебаний вдоль оси Z в 2–3 раза меньше, чем у типичных гало-орбит. Период колебаний вдоль оси Z у орбит Лиссажу также равен примерно 180 сут, поэтому узлы разворота находятся в одних и тех же областях, а трек повторяется из года в год. Орбиты Лиссажу обеспечивают несколько лучшую радиовидимость с северных широт по сравнению с гало-орбитами, так как КРТ уходит не так глубоко под плоскость эклиптики.

На рис. 9 в качестве примера изображена проекция Мольвейде с орбитой Лиссажу, которая использовалась в проекте *GAIA* [16]. Из этой проекции можно сделать вывод, что статистика минимальных проекций баз для орбиты Лиссажу *GAIA* будет еще хуже, чем у гало-орбиты *Снекпр-М*. Это подтверждается расчетами: всего лишь 10% источников и 6% узлов равновеликой сетки небесной сферы имеют проекции баз до 5 ED (рис. 10, 11).

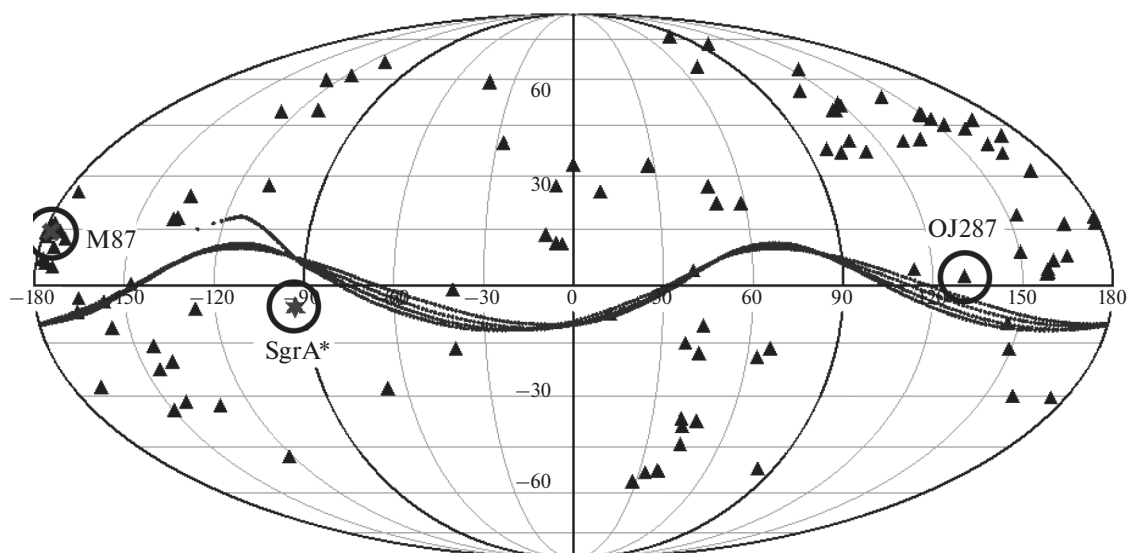


Рис. 9. Геоцентрическая эклиптическая проекция Мольвейде. На проекции изображен трек КА *GAIA* за 3.6 лет и источники из предварительного каталога в виде треугольников.

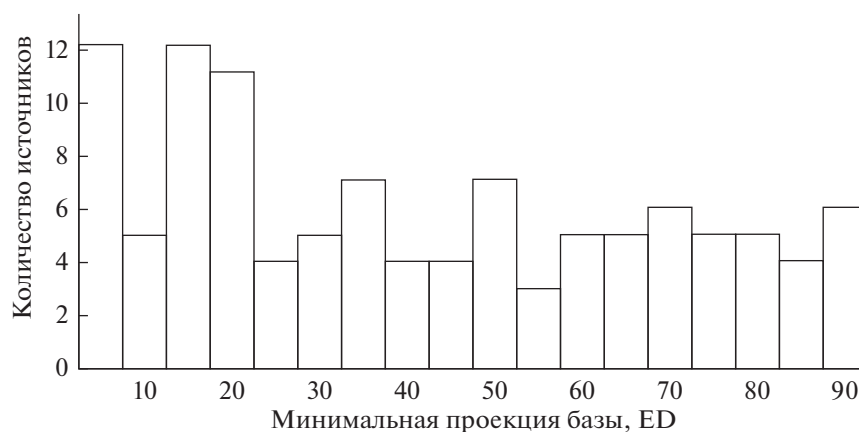


Рис. 10. Распределение источников предварительного каталога по минимальной проекции базы для орбиты Лиссажу *GAIA*.

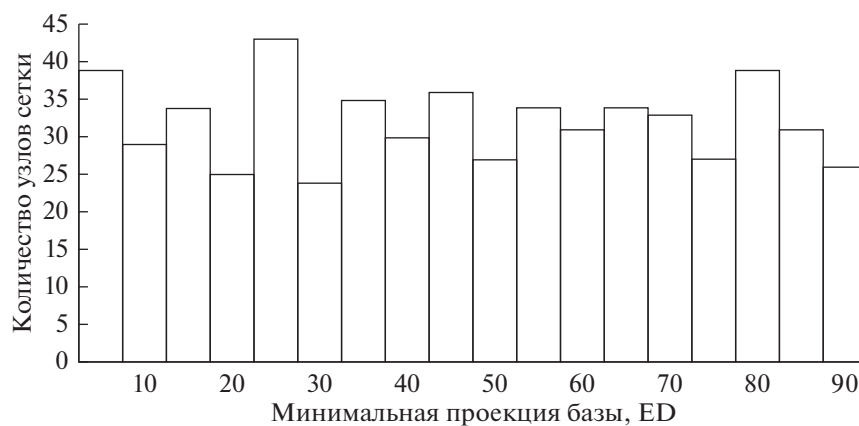


Рис. 11. Распределение узлов равновеликой сетки небесной сферы по минимальной проекции базы для орбиты Лиссажу *GAIA*.

С точки зрения интерферометрии, орбиты Лиссажу похожи на гало-орбиты, так как для них характерны все те же особенности, что и у гало-орбит, но небольшие отличия в движения КА ухудшают статистику минимальных проекций баз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Текущая гало-орбита, несомненно, идеально подходит для режима одиночной антенны: она обеспечивает необходимый тепловой режим КРТ и отличную видимость всей небесной сферы. В режиме КРСДБ для всех целевых источников существуют проекции баз больше 90 ED. Тем не менее, имеется ряд существенных недостатков с точки зрения проведения наблюдений в режиме КРСДБ.

Во-первых, для всех источников наблюдается крайне медленная эволюция UV -заполнений, потому что КРТ находится в 1.5 млн км от Земли, и его относительная скорость не превышает 1 км/с.

Во-вторых, полугодовой период орбиты приводит к бедной статистике малых проекций баз: только 12% источников из предварительного каталога и 20% узлов равновеликой сетки небесной сферы имеют проекции баз меньше 5 ED.

В-третьих, существуют сложности с эффективным использованием наблюдательного времени. Между двумя последовательными наблюдениями, в течение которых реализуются хорошие UV -заполнения, может пройти несколько месяцев. 72% времени всей миссии ни для одного источника предварительного каталога нет малых проекций баз до 20 ED.

Эти же недостатки есть и у других ограниченных орбит около L_2 , в том числе и у часто используемых на практике орбит Лиссажу. В любом случае, орбита в окрестности L_2 необходима для режима одиночной антенны, поэтому отказаться от нее полностью нельзя.

Одним из возможных решений для Миллиметрона может быть использование комбинированной орбиты, состоящей из гало-орбиты (для режима одиночной антенны) и околоземной орбиты (для режима КРСДБ). Однако в силу ограниченного запаса топлива построение такой орбиты нетривиально. В работе [17] был выполнен аналогичный расчет для *РадиоАстрона*, где рассматривался перелет с высокой эллиптической орбиты на гало-орбиту в окрестности L_2 с помощью гравитационного маневра у Луны. Затрачиваемый импульс для *РадиоАстрона* при этом оценивался в 63 м/с, что является приемлемым в пересчете на массу *Спектр-М*, который почти что в два раза тяжелее *РадиоАстрона*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smirnov A.V., Baryshev A.M., Pilipenko S.V. et al. Space mission Millimetron for terahertz astronomy // Space Telescopes and Instrumentation 2012: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Proceedings of the SPIE. 2012. V. 8442.
2. Кардашёв Н.С., Новиков И.Д., Лукаш В.Н. и др. Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // УФН. 2014. Т. 184. № 12. С. 1319–1352.
3. Wild W., Kardashev N.S. Millimetron – a large Russian-European submillimeter space observatory // Experimental Astronomy. 2009. V. 23. № 1. P. 221–244.
4. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968.
5. Ильин И.С., Сазонов В.В., Тучин А.Г. Построение ограниченных орбит в окрестности точки либрации L_2 системы Солнце–Земля // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 65.
6. Ильин И.С., Заславский Г.С., Лавренов С.М. и др. Баллистическое проектирование траекторий перелета с орбиты искусственного спутника Земли на гало-орбиту в окрестности точки L_2 системы Солнце–Земля // Космич. исслед. 2014. Т. 52. № 6. С. 476–488. (Cosmic Research. P. 437–449).
7. Михеева Е.В., Лукаш В.Н., Репин С.В. и др. Каталог сверхмассивных черных дыр для интерферометрических наблюдений // Астрономический журн. 2019. Т. 96. № 4. С. 339–348.
8. Taylor G.B., Carilli C.L., Perley R.A. et al. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II // ASP Conference Series. 1999. V. 180.
9. Томпсон А.Р., Моран Д.М., Свенсон Д.У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
10. Кардашев Н.С., Крейсман Б.Б., Погодин А.В. и др. Проектирование орбиты космического аппарата “Спектр-Р” для наземно-космического радиоинтерферометра // Космич. исслед. 2014. Т. 52. № 5. С. 1–10. (Cosmic Research. P. 332–341).
11. Ricarte A., Dexter J. The Event Horizon Telescope: exploring strong gravity and accretion physics // MNRAS. 2015. V. 446. № 2. P. 1973–1987.
12. Шайхутдинов А.Р., Рудницкий А.Г., Лихачев С.В. и др. Возможные конфигурации орбиты наземно-космического радиоинтерферометра “Миллиметрон” // Труды ИПА РАН. 2018. № 47. С. 72–78.
13. Бугаевский Л.М. Математическая картография. М.: Златоуст, 1998.
14. Bernelli-Zazzera F., Toppo F., Massari M. Assessment of Mission Design Including Utilization of Libration Points and Weak Stability Boundaries. Milano: Politecnico di Milano (ESA/ESTEC contract No. 18147/04/NL/MV). 2004.
15. Маркеев А.П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. М.: Наука, 1978.
16. Prusti T., de Bruijne J.H.J., Brown A.G.A. et al. The GAIA mission // A&A. 2016. V. 595. № A1.
17. Kovalenko I.D., Eismont N.A. Final manoeuvre from highly elliptical orbit towards Lagrangian points // 15th International Conference on Space Operations. 2018. <https://doi.org/10.2514/6.2018-2673>