УДК 524.5

## ВОЗМОЖНОСТИ И ГЕОМЕТРИЯ РЕЖИМА РСДБ МИССИИ "МИЛЛИМЕТРОН"

А.Г. Рудницкий, П.Р. Запевалин, П.В. Мжельский, Т.А. Сячина, М.А. Щуров

> Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) – уникальная методика, позволяющая проводить наблюдения наиболее компактных астрономических объектов с высоким угловым разрешением. В данной работе продемонстрированы возможности режима РСДБ обсерватории "Миллиметрон" в отношении решения задач картографирования теней черных дыр и наблюдения за компактными структурами в их ближайших окрестностях. В работе уделяется внимание не только чувствительности и частотной конфигурации интерферометра космос-земля, но и его геометрии, а именно орбитальным конфигурациям обсерватории "Миллиметрон" и их наблюдательным возможностям.

Ключевые слова: интерферометрия, РСДБ, сверхмассивные черные дыры.

Введение. Одними из наиболее перспективных и ключевых направлений в области проведения РСДБ наблюдений являются детальное исследование близких окрестностей и наблюдение фотонных колец в сверхмассивных черных дырах (СМЧД). Первые результаты подобных исследований были продемонстрированы консорциумом EventHorizonTelescope (ЕНТ) в 2019 г. [1]. Однако, недостаточное угловое разрешение, которое может быть достигнуто на Земле, а также ограничения, накладываемые земной атмосферой на проводимые наблюдения, не позволяют получить наиболее полной картины и детально исследовать близкие окрестности сверхмассивных черных дыр. Запуск в космос обсерватории "Миллиметрон", способной наблюдать совместно с наземными антеннами в режиме интерферометра, позволит преодолеть вышеуказанные ограничения.

Астрокосмический Центр ФИАН, 117997 Россия, Москва, ул. Проф<br/>союзная, 84/32; e-mail: arud@asc.rssi.ru.

Параметры режима РСДБ обсерватории "Миллиметрон". Режим интерферометра обсерватории "Миллиметрон" будет иметь 4 частотных диапазона. В каждом из диапазонов будет возможность проводить наблюдения в двух круговых поляризациях: левой (LCP) и правой (RCP). Ширина полосы одного канала составляет около 1 ГГц. В табл. 1 приведена информация о частотной конфигурации и проектной шумовой температуре  $T_{rx}$  бортового приемного комплекса РСДБ обсерватории "Миллиметрон".

## Таблица 1

Частота, ГГц	$T_{rx}, \mathbf{K}$	Поляризация	Ширина полосы, ГГц	
31–45	< 17	RCP, LCP	0.97 ГГц	
84–136	< 37	RCP, LCP	0.97 ГГц	
211 - 275	< 90	RCP, LCP	0.97 ГГц	
275-373	< 120	RCP, LCP	0.97 ГГц	
690	_	RCP, LCP	0.97 ГГц	

Перечень РСДБ приемников обсерватории "Миллиметрон" и их параметры

Таблица 2

Чувствительность частотных диапазонов режима РСДБ обсерватории "Миллиметрон"

Частотная полоса,	Частота*,	$SEFD_{\rm MM},$	$SEFD_{ALMA}^{**},$	$SEFD_{\text{MM-ALMA}},$
ГГц	ГГц	Ян	Ян	Ян
31 - 45	40	1100	14	124
84–136	90	2760	42	340
211 - 275	240	5520	58	565
275-373	340	7180	70	710

В табл. 2 приведены оцененные чувствительности SEFD (SystemEquivalentFluxDensity) в Ян обсерватории "Миллиметрон" для каждого из частотных диапазонов РСДБ, а также совместная чувствительность интерферометра на базе "Миллиметрон"-ALMA.

Используя значения SEFD, можно оценить среднеквадратичное отклонение (СКО) регистрируемого потока на базе, состоящей из телескопов "1" и "2" используя следующее выражение:

$$\delta S = 1.14 \cdot \frac{SEFD_{1-2}}{\sqrt{2\Delta F\tau}},$$

39

где 1.14 — коэффициент коррекции квантования сигнала,  $\Delta F$  — ширина полосы регистрируемого сигнала (Гц) и  $\tau$  — время интегрирования в секундах.



Рис. 1: Графики зависимости среднеквадратичного отклонения (СКО) регистрируемого потока на базе ММ-ALMA. Слева приведена зависимость СКО регистрируемого потока от ширины полосы (время интегрирования выбиралось 1 с), справа приведена зависимость СКО регистрируемого потока от времени интегрирования (ширина полосы выбиралась 2 ГГц).

На рис. 1 приведены графики зависимости СКО в мЯн от ширины полосы (слева) и времени интегрирования (справа). Для расчета зависимости от ширины полосы выбиралось время интегрирования 1 с. Для расчета зависимости от времени интегрирования выбиралась ширина полосы 2 ГГц.

Таким образом, порог детектирования на базе "Миллиметрон"-ALMA на уровне  $5\sigma$ на частоте 240 ГГц при среднем времени интегрирования 10 секунд и ширине полосы 4 ГГц составит 5 мЯн. В наиболее неблагоприятном случае, когда влияние атмосферы не позволяет достичь столь стабильного времени интегрирования, полагая, что  $\tau = 1$  с, величина  $5\sigma$  составит 35 мЯн.

Конфигурация орбиты. Изначально орбитой космической обсерватории "Миллиметрон" была выбрана орбита в окрестности точки Лагранжа L2 системы "Солнце-Земля". Такая конфигурация позволяет обеспечивать и поддерживать необходимый режим работы бортовой системы активного охлаждения антенны и комплекса научной аппаратуры, а также в полной мере реализовать наблюдательный потенциал обсерватории в режиме одиночной антенны. Несмотря на то, что орбита в окрестности точки L2 в течение года позволяет проводить обзорные наблюдения практически всей небесной сферы, существуют ограничения, связанные с проведением РСДБ наблюдений в режиме картографирования.

Ранее был предложен вариант разделения миссии на два этапа: проведение наблюдений на орбите в окрестности точки L2 и последующий переход на высокоэллиптичную околоземную орбиту [2]. Околоземная орбита обладает рядом преимуществ в проведении сеансов картографирования, а именно позволяет получать более качественное (u, v)-заполнение и имеет высокую частоту проведения повторных наблюдений.



Рис. 2: Новая номинальная орбита в окрестности точки L2 для обсерватории "Миллиметрон": (a) проекция XY, (б) проекция XZ, (в) проекция YZ. L2 – центрическая система координат.

Однако, переход к высокоэллиптичной околоземной орбите требует существенных топливных затрат, либо дополнительных сложных гравитационных манёвров. Поэтому был предложен вариант новой номинальной орбиты в окрестности точки L2 с максимальным выходом из плоскости эклиптики 400000 км. Такая величина выхода из плоскости эклиптики обеспечивает наилучшую ежесуточную радиовидимость (не менее 6 часов в сутки) космического аппарата с наземных пунктов управления, расположенных на территории Российской Федерации. Это важно для проведения не только сеансов управления космическим аппаратом, но также и для приёма научной информации наземными станциями слежения. На рис. 2 изображены проекции XY, XZ и YZданной орбиты в L2 центрической системе координат.

Изображение тени черной дыры. Для демонстрации возможностей картографирования в режиме РСДБ с использованием новой номинальной орбиты, были проведено предварительное моделирование таких наблюдений. В качестве целевых источников были выбраны SgrA\* и M87, которые являются приоритетными объектами для наблюдения в режиме РСДБ для обсерватории "Миллиметрон". В качестве наземного плеча интерферометра были выбраны телескопы, входящие в ЕНТ: Atacama Large Millimeter Array (ALMA), Atacama Pathfinder Experiment (APEX), Greenland Telescope (GLT), James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), Large Millimeter Telescope (LMT), Submillimeter Telescope (SMT), Submillimeter Array (SMA), Kitt Peak National Observatory (KP) и Northern Extended Millimeter Array (NOEMA) [3]. Следующие параметры наблюдений использовались в моделировании: частота наблюдений – 240 ГГц, ширина полосы – 2 ГГц, время интегрирования – 10 с. Общая продолжительность наблюдений составляет 900 минут, что соответствует ограничению объема бортовой памяти обсерватории "Миллиметрон" в 100 Тб.



Рис. 3: Заполнение (u, v) плоскости с новой номинальной орбиты в окрестностях точки L2: слева – для источника M87, справа – для источника SgrA\*. (u, v) заполнения приведены для частоты 240 ГГц. Голубым цветом показаны точки наземнокосмических баз, синим показаны точки наземных баз.

На рис. 3 показаны заполнения (u, v) плоскости, полученные для новой номинальной орбиты в окрестности точки L2 для источников M87 и SgrA\* соответственно. Конфигурация орбиты подбиралась таким образом, чтобы присутствовали участки на орбите, позволяющие реализовывать проекции базы наземно-космического интерферометра, которые имели бы пересечение с проекциями базы наземных телескопов и лежали в диапазоне от 0 до 2 диаметров Земли. При этом, учитывая особенности геометрии орбиты в окрестностях точки L2, относительно качественное (u, v) заполнение для картографирования источника M87 достигается при угловом разрешении  $\sim$ 5 микросекунд дуги. Безусловно, представленная конфигурации орбиты позволяет проводить наблюдения с угловым разрешением менее 5 микросекунд дуги. Однако, в этом случае будет происходить вырождение (u, v) плоскости по одному из направлений, что не позволит выполнять картографирование.

В дальнейшем с помощью программного обеспечения AstroSpaceLocator на полученные (u, v) заполнения накладывались модели распределения яркости источников M87 и SgrA\* [4]. Для SgrA\* использовались магнитогидродинамические (МГД) модели из работы [5]. Для источника M87 использовались МГД модели, построенные на основе работы [6]. После наложения моделей, производилось восстановление изображений в программном пакете AstroSpaceLocator (подпрограмма Imager), используя метод CLEAN (подробнее про метод см. работу [4]).



Рис. 4: Модели (слева) и полученные изображения (справа) источников M87 ((a), (б))  $u SgrA^*$  ((6), (г)).

Представленные на рис. 4 изображения тени черной дыры для SgrA\* (г) и M87 (б) показывают принципиальную возможность построения изображений на орбите в окрестностях точки L2 с разрешением порядка 5 микросекунд дуги и не хуже, чем на околоземных орбитах [2].

Наблюдение фотонных колец. Общая теория относительности предсказывает наличие в близкой окрестности чёрных дыр так называемых "фотонных колец". Их присутствие обусловлено тем, что фотоны, попадая в область действия гравитации чёрной дыры, движутся по искривлённому пространству-времени по круговым орбитам вокруг чёрной дыры вблизи горизонта событий. Такие кольца состоят из бесконечного набора самоподобных колец, каждое из которых соответствует определённому количеству оборотов фотонов, вращающихся вокруг тени чёрной дыры [7].

При наблюдениях колец на интерферометре с необходимым угловым разрешением (соответствующим проекциям баз интерферометра от 10 диаметров Земли) на графике зависимости амплитуды функции видности от проекции базы V(R) можно обнаружить осцилляции (см. рис. 5). Как показано в [7], измеряя величину и частоту этих осцилляций, можно точно измерить массу и спин черной дыры. Данная методика не предполагает проведения картографирования и не требует качественного и относительно



Рис. 5: Зависимость амплитуды функции видности от проекции базы V(R) интерферометра "Миллиметрон – ALMA" для смоделированных наблюдений фотонных колец в источнике M87. Слева – результат моделирования без учета чувствительности телескопов, справа – результат с учетом чувствительностей телескопов.

симметричного заполнения (u, v) плоскости. Соответственно, выбирались те участки орбиты, на которых реализовывались бы проекции базы > 10 диаметров Земли, обеспечивающие угловое разрешение < 0.2 микросекунды дуги.

Как видно из рис. 5 (слева), на графике наблюдаются осцилляции V(R), соответствующие наличию фотонных колец. Однако стоит отметить, что данные осцилляции обладают малой интенсивностью. Если наложить на эти данные реальные чувствительности телескопов, то обнаружение этих осцилляций будет затруднено (см. рис. 5 справа). Наложение модели чувствительности телескопов интерферометра на данные показывает, что обнаружить осцилляции в зависимости V(R) в реальных условиях будет сложнее. Проведение Фурье-анализа в этом случае затруднительно из-за разрывности данных (обусловленных вращением Земли). Использование периодической функции (например, при помощи МНК) не является надёжным методом, когда периодический сигнал наложен на какую-то функцию неизвестного вида, как в нашем случае.

Выводы и заключение. Был предложен вариант новой номинальной орбиты в окрестностях точки L2 с максимальным выходом из плоскости эклиптики ~400000 км, который позволяет проводить сеансы картографирования и обеспечивает ежесуточную радиовидимость космического аппарата станциями слежения, расположенными на территории Российской Федерации не менее 6 часов. Была показана возможность получать изображения окрестностей СМЧД с разрешением не хуже 5 микросекунд дуги, используя такую новую номинальную орбиту в окрестностях точки L2.

В части двухэтапного варианта конфигурации орбиты для обсерватории "Миллиметрон", необходимо проведение детального исследования возможностей перелета с использованием гравитационных маневров.

Благодаря тому, что орбита в окрестности точки L2 реализует протяженные проекции базы (вплоть до 100 диаметров Земли), существует возможность наблюдать первое фотонное кольцо в диске СМЧД. Оценки чувствительности подтверждают возможность детектирования потоков от первого кольца с достоверностью не хуже  $5\sigma$  в случае благоприятных погодных условий на наземных телескопах, обеспечивающих время когерентного накопления  $\tau = 10$  с. Для того, чтобы наблюдать кольца более высоких порядков, необходимо улучшение чувствительности, например, путем увеличения ширины полосы приёма сигнала.

*Благодарности.* Коллектив авторов выражает благодарность Сергею Чернову за предоставленную модель источника M87.

## ЛИТЕРАТУРА

- Event Horizon Telescope Collaboration, K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, et al., The Astrophysical Journal Letters 875(1), L6 (2019). DOI: 10.3847/2041-8213/ab1141.
- [2] A. S. Andrianov, A. M. Baryshev, H. Falcke, et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 500(4), 4866 (2021). DOI: 10.1093/mnras/staa2709.
- [3] Event Horizon Telescope Collaboration, K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, et al., The Astrophysical Journal Letters 875(1), L2 (2019). DOI: 10.3847/2041-8213/ab0c96.
- [4] S. F. Likhachev, I. A. Girin, V. Yu. Avdeev, et al., Astronomy and Computing 33, Article id: 100426 (2020). DOI: 10.1016/j.ascom.2020.100426.
- [5] M. Moscibrodzka, H. Falcke, H. Shiokawa, C. F. Gammie, Astronomy and Astrophysics 570, Article Number: A7, 10 (2014). DOI: 10.1051/0004-6361/201424358.
- [6] С. В. Чернов, Астрономический журнал **98**(2), 132 (2021). DOI: 10.31857/S0004629921020018.
- M. D. Johnson, A. Lupsasca, A. Strominger, et al., Science Advances 6(12), Id. eaaz1310 (2020). DOI: 10.1126/sciadv.aaz1310.

Поступила в редакцию 14 мая 2021 г.

После доработки 29 июля 2021 г.

Принята к публикации 30 июля 2021 г.

Публикуется по рекомендации оргкомитета 1-ой "Московской Международной конференции по миллиметровой и субмиллиметровой астрономии", 12–16 апреля 2021, АКЦ ФИАН.