

МНОГОЧАСТОТНЫЙ СИНТЕЗ В КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ

© 2024 г. А. Г. Рудницкий^{1,*}, М. А. Щуров^{1,**}, С. В. Чернов^{1,***}

¹Астрокосмический центр Физического института
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: arud@asc.rssi.ru

**E-mail: shurovma@lebedev.ru

***E-mail: chernov@td.lpi.ru

Поступила в редакцию 30.03.2024 г.

После доработки 17.04.2024 г.

Принята в печать 23.04.2024 г.

В работе рассматриваются возможности применения методов многочастотного синтеза для космических радиointерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ) с целью улучшения заполнения (u, v) плоскости и повышения качества получаемых синтезируемых изображений. Для оценки вклада от использования методов многочастотного синтеза выполнены моделирования РСДБ наблюдений на примере концепции космического РСДБ, использующего комбинацию круговых околоземных орбит.

Ключевые слова: интерферометрия, РСДБ, сверхмассивные черные дыры

DOI: 10.31857/S0004629924060067 **EDN:** JMIUJH

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиointерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является уникальной техникой проведения астрономических наблюдений с высоким угловым разрешением. Новый виток развития РСДБ начался после успешного запуска космической обсерватории Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy (HALCA) или VLBI Space Observatory Programme (VSOP) в 1997 г. [1], а затем обсерватории Радиоастрон (Спектр-Р) в 2011 г. [2]. Успешные наблюдения позволили достигнуть беспрецедентного углового разрешения $8\mu\text{as}$ ¹ [3].

В 2017 г. впервые в истории радиоастрономии были получены изображения сверхмассивных черных дыр (СМЧД) с помощью наземной РСДБ сети миллиметрового диапазона «Телескоп Горизонта Событий» (Event Horizon Telescope или ЕНТ) [4]. Такие уникальные результаты сподвигли дальнейшее стремительное развитие технологии РСДБ в сторону создания новых концепций космических радиointерферометров, которые используют несколько космических радиотелескопов для проведения РСДБ наблюдений [5]. Преимущества таких систем неоспоримы. Отсутствие земной атмосферы позволяет проводить наблюдения на более высоких частотах

(выше 345 ГГц), недоступных на наземных радиотелескопах. Тщательно подобранные конфигурации орбит космических телескопов позволяют также достичь гораздо более высокого углового разрешения по сравнению с наземными и некоторыми наземно-космическими РСДБ системами, а также исследовать динамику близких окрестностей СМЧД.

Одной из основных научных задач космических радиointерферометров со сверхдлинной базой по-прежнему остается получение детальных изображений близких СМЧД. Ожидаемое качество изображений существенно будет превосходить ЕНТ [5]. Однако, из-за особенностей получения изображений радиоисточников с помощью РСДБ вопрос улучшения заполнения (u, v) плоскости в проводимых РСДБ наблюдениях остается актуальным и для космических интерферометров. В этом случае критически важным моментом становится поиск оптимальных конфигураций орбит для космических радиотелескопов, а также задействование многочастотного синтеза (МЧС) в проводимых наблюдениях.

В настоящей работе рассматриваются возможности использования МЧС в проектах космических РСДБ интерферометров применительно к наблюдениям близких окрестностей сверхмассивных черных дыр (СМЧД).

¹ μas — микросекунда дуги.

2. КОСМИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Космический радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (КРСДБ) предполагает использование радиотелескопов, находящихся на космических аппаратах за пределами Земли. Это могут быть как орбитальные телескопы, так и телескопы, расположенные, например, на поверхности Луны [6]. В рамках настоящей работы в качестве основы для оценки возможностей МЧС в КРСДБ рассматривается концепция интерферометра, представленного в работе [7]. Особенностью такой концепции является использование комбинаций регулярных и ретроградных орбит, что позволяет за относительно короткое время (менее 20 часов) получать высокодетальные изображения астрономических источников.

Такой космический радиоинтерферометр состоит из четырех телескопов, расположенных на низких и средних круговых околоземных орбитах с радиусами 7500, 8000, 22 500 и 23 000 км соответственно. Параметры орбит представлены в табл. 1. Диаметр антенны каждого телескопа равен $D = 4$ м. Верхняя частота наблюдений составляет 690 ГГц. Это гораздо выше той, на которой успешно проводились наземные РСДБ наблюдения в проекте ЕНТ (230 ГГц [4]). Выбор такой высокой частоты обосновывается задачей наблюдений близких окрестностей СМЧД, в которых на более низких частотах доминируют эффекты рассеяния [8, 9].

Стоит отдельно отметить, что количество телескопов в концепции [7], которая используется в данной работе, обосновывается возможностью осуществлять замыкание амплитуд. Дело в том, что любой РСДБ интерферометр, состоящий из трех телескопов, позволяет осуществлять замыкание фаз. Такой подход дает возможность осуществлять самокалибровку фазы и восстанавливать истинную фазу в изображении, т. к. фазовые ошибки отдельных телескопов в таком случае нивелируются [10]. В то же время, наличие четырех телеско-

пов позволяет осуществить замыкание амплитуд и устранить ошибки в амплитудной калибровке. Поэтому РСДБ интерферометр, состоящий из четырех телескопов, в том числе космический, будет самокалибруемой системой как по фазе, так и по амплитуде, что является ключевым моментом в повышении качества восстанавливаемых изображений методами апертурного синтеза [10, 11].

3. МНОГОЧАСТОТНЫЙ СИНТЕЗ

В рамках настоящей работы рассматривается многочастотный синтез, который предполагает одновременные наблюдения в нескольких частотных диапазонах, аналогично тому, как это реализовано на телескопах Коре́йской РСДБ сети [12] и планируется к реализации на наземной РСДБ сети телескопа горизонта событий нового поколения [13], а также в рамках космической обсерватории Миллиметрон [14–16]. Стоит отметить, что ранее в наземных и наземно-космических (Радиоастрон) наблюдениях использовался МЧС с переключением частот (см., напр., [17]) в сантиметровом диапазоне длин волн. Однако, такой подход особых преимуществ не выявил.

Говоря о многочастотном синтезе с использованием одновременных наблюдений на нескольких частотах в широком диапазоне, такой подход позволяет получать как высококачественные изображения, интерполированные на выбранной частоте внутри диапазона, который определяется самой низкой и самой высокой частотой в таких наблюдениях, так и выполнить оценки спектральных характеристик радиоисточников. Этот подход важен не только для космических РСДБ миссий, но также и для наземного РСДБ [13]. Для этих целей существуют проверенные алгоритмы синтеза радиоизображений [18], программно реализованные в пакете Astro Space Locator [19].

Многочастотный синтез изображений позволяет не только улучшить качество и точность изображений, но и определить морфологию наблюдаемых радиоисточников, а также осуществлять перенос фазы с более низких частот на более высокие для увеличения времени когерентного накопления сигнала [20]. Последнее как раз наиболее важно для наземных и наземно-космических РСДБ интерферометров. В контексте КРСДБ с точки зрения вспомогательных и практических функций МЧС помогает осуществлять поиск интерференционного лепестка на более высоких частотах с помощью детектирований на более низких частотах при наличии неопределенности знания вектора состояния

Таблица 1. Параметры орбит телескопов космического радиоинтерферометра

Радиус орбиты, км	Наклонение, °
7500	–61
8000	119
22500	–61
23000	119

Примечание. Параметры приведены для прямого восхождения восходящего узла RAAN = –3.6°.

космических радиотелескопов, аналогично тому, как это делалось при обработке РСДБ данных миссии Радиоастрон [21].

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки возможностей МЧС применительно к КРСДБ было выполнено моделирование одновременных наблюдений близких окрестностей СМЧД М87 на трех частотах: 230, 375 и 690 ГГц. При моделировании геометрии и (u, v) заполнения интерферометра использовались орбиты из [7]. Параметры представлены в табл. 1. Для моделирования заполнения (u, v) плоскости, применения моделей источника и последующего восстановления синтезированных изображений использовался программный пакет Astro Space Locator [19]. Мгновенная полоса пропускания бралась равной $\Delta\nu = 16$ ГГц. Общая продолжительность моделируемых наблюдений составила 20 часов. Длительность одного сегмента (скана) в наблюдениях выбиралась равной $\Delta t = 10$ с. Такая продолжительность скана выбиралась из соображений минимизации размытия синтезированной диаграммы направленности интерферометра на самой высокой из трех частот (690 ГГц) [22]. Для удобства продолжительность скана выбиралась одинаковой для всех частот.

Модели распределения яркости СМЧД М87 основывались на работе [23]. Модели распределения яркости М87 соответствуют следующим параметрам СМЧД: спин $a = 0.9375$, масса $M = 6.5 \times 10^9 M_\odot$

(где $M_\odot$ — масса Солнца), угол наклона наблюдателя к оси вращения черной дыры $i = 20^\circ$. На рис. 1 представлены модели для 230, 375 и 690 ГГц соответственно. Модели в данном спектральном диапазоне имеют гладкий спектр со слабыми неоднородными свойствами с максимумом спектра на частоте 150 ГГц. Это обусловлено несколькими факторами. В частности, свойствами плазмы в данном частотном диапазоне в сильном гравитационном поле. В будущем предлагается исследовать более сложные модели с сильно неоднородными спектральными свойствами с расширением рассматриваемого частотного диапазона. Наложение видности смоделированного распределения яркости М87 сопровождалось добавлением шумовой составляющей, которая соответствует оценочной чувствительности интерферометра на каждой частоте. Для этого оценивалась величина собственных шумов системы (SEFD — System Equivalent Flux Density) и флуктуационная чувствительность в континууме по плотности потока σ :

$$\begin{cases} \text{SEFD} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{A_e \times 10^{-26}}, \\ \sigma = \frac{\text{SEFD}}{2\sqrt{\Delta\nu\Delta t}}, \end{cases} \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, T_{sys} — системная температура в Кельвинах, $A_e = \eta A_g$ — эффектив-

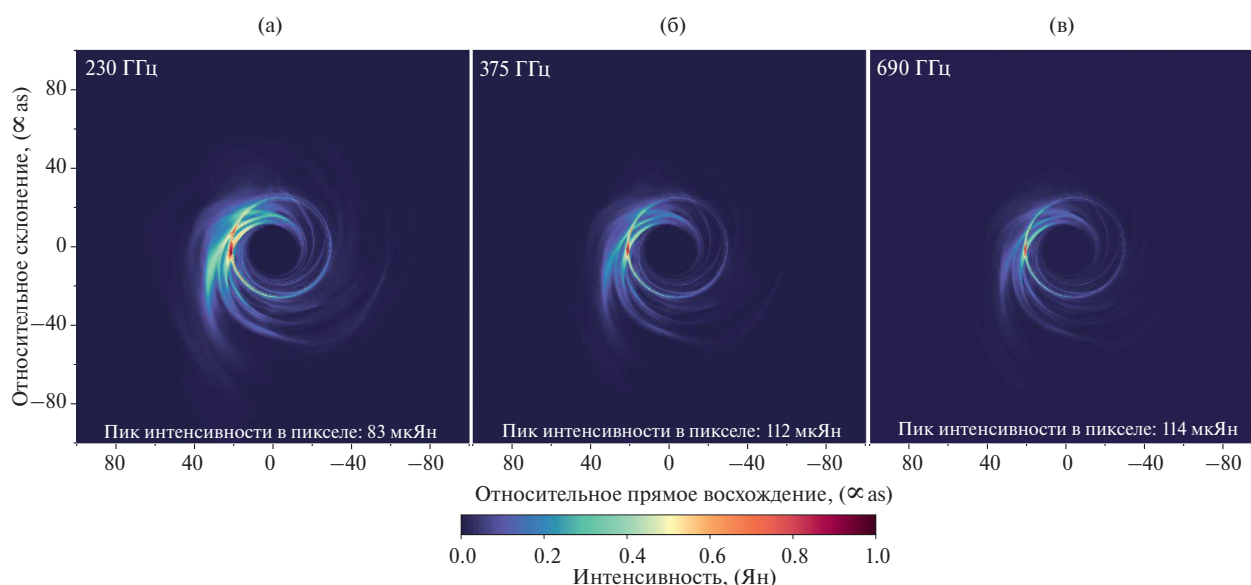


Рис. 1. Модели источника М87: 230 ГГц (а), 375 ГГц (б) и 690 ГГц (с). Цветовая шкала отнормирована на пиковую интенсивность в пикселе для каждой модели.

ная площадь антенны. Здесь $A_g = \pi R^2$ — геометрическая площадь антенны ($R = D / 2 = 2$ м), коэффициент $\eta = \exp(-4\pi\sigma_A / \lambda)$, σ_A — среднеквадратичное отклонение (СКО) поверхности антенны, λ — длина волны наблюдения, $\Delta\nu$ — мгновенная полоса пропускания приемника (16 ГГц), Δt — продолжительность скана (10 с).

В табл. 2 приведены оценки ожидаемых собственных шумов системы (SEFD) в Янских и флуктуационная чувствительность в континууме по плотности потока σ в мЯн, рассчитанные при заданных выше параметрах ν , $\Delta\nu$, Δt и D , с температурой приемников $T_{sys} = 45, 60$ и 200 К для 230, 375 и 690 ГГц соответственно.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлено смоделированное заполнение (u, v) плоскости. Цветами показаны точки фазовой плоскости, которые соответствуют своему

Таблица 2. Собственные шумы системы (SEFD) каждого из телескопов и флуктуационная чувствительность в континууме по плотности потока (σ) интерферометра на рассмотренных частотах

Частота, ГГц	SEFD, Ян	σ , мЯн
230	44 049.7	12.98
375	44 219.8	13.03
690	44 876.2	13.22

Примечание. Данные приведены для следующих параметров: $\sigma_A = 10$ мкм, $T_{sys} = 45, 60$ и 200 К (230, 375, 690 ГГц), $R = D / 2 = 2$ м, $\Delta\nu = 16$ ГГц.

частотному диапазону: 230 ГГц (синие точки), 375 ГГц (красные точки) и 690 ГГц (серые точки). Применение моделей источников на рассчитанные (u, v) заполнения позволяет восстановить изображения. Для этого использовался классический

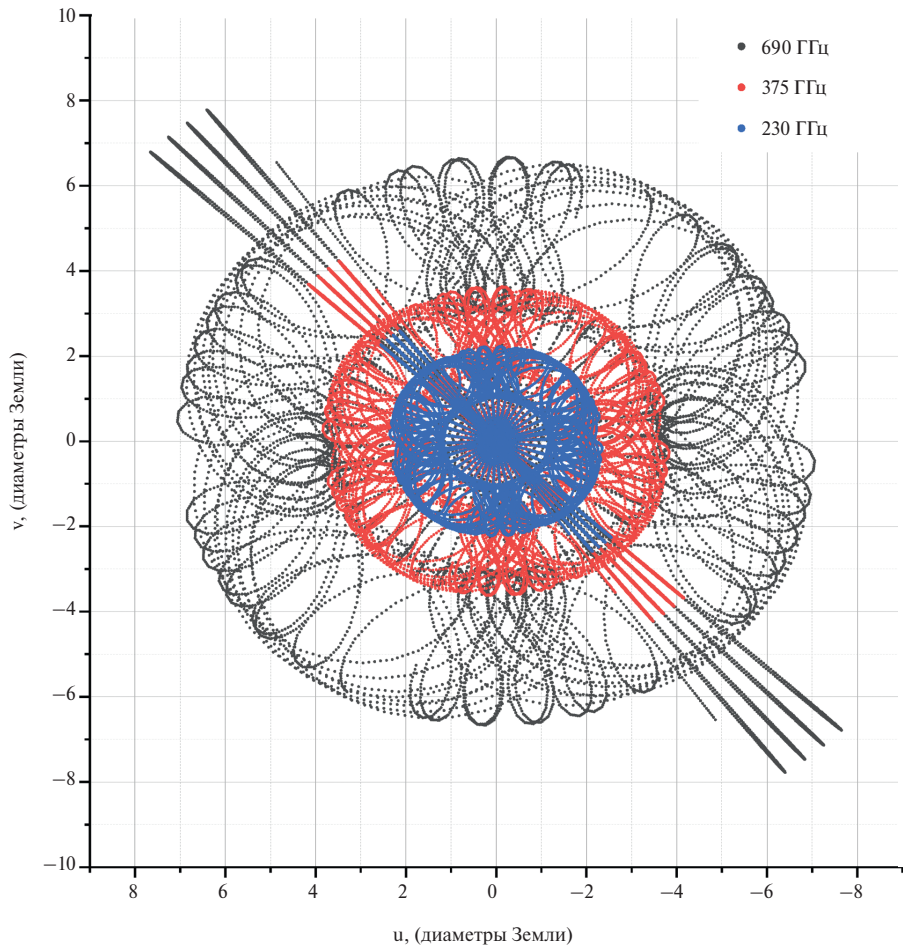


Рис. 2. Смоделированное заполнение (u, v) плоскости для частот: 230 (синие точки), 375 (красные точки) и 690 ГГц (серые точки). Длительность моделируемых наблюдений составила 20 часов.

метод CLEAN с количеством итераций $N = 5000$ [19]. На рис. 3 приведены полученные изображения для 230, 375 и 690 ГГц соответственно. Параметры восстановления изображения брались следующие: поле зрения $200 \times 200 \mu\text{as}$, размер сетки 1024×1024 , равномерное взвешивание (uniform gridding) [19]. Как видно из рисунков, изображение для 690 ГГц имеет низкое отношение сигнала к шуму из-за невысокой чувствительности системы. Разрешение получаемых изображений или размер синтезированной диаграммы направленности интерферометра (луч) составило: $7.1 \times 5.7 \mu\text{as}$, PA: -38.79° (230 ГГц), $4.4 \times 3.6 \mu\text{as}$, PA: -36.47° (375 ГГц), $2.4 \times 1.9 \mu\text{as}$, PA: -35.52° (690 ГГц), где PA — позиционный угол главной оси эллиптической синтезированной диаграммы направленности.

Для оценки преимуществ многочастотного синтеза с точки зрения улучшения качества получаемых изображений, с помощью МЧС синтезировалось изображение на частоте 230 ГГц (т. е. учитывался вклад от данных 375 и 690 ГГц), полученное изображение сравнивалось с моделью на частоте 230 ГГц и с изображением, полученным с использованием только одной частоты 230 ГГц. На рис. 4 приведены изображения, полученные с помощью МЧС. В этом случае, разрешение изображений,

полученных с помощью МЧС, выше на низких частотах за счет добавления более высоких: $4.7 \times 3.8 \mu\text{as}$, PA: -35.29° (230+375 ГГц), $3.3 \times 2.5 \mu\text{as}$, PA: -39.84° (230+690 ГГц), $2.9 \times 2.3 \mu\text{as}$, PA: -36.62° (230+375+690 ГГц). Сравнение выполнялось путем вычисления среднеквадратичного отклонения полученного изображения относительно модели по всем ячейкам изображения (1024×1024).

Полученные результаты показывают, что среднеквадратичное отклонение для восстановленных с помощью МЧС изображений относительно модели 230 ГГц на частотах 230, 230+375, 230+690 и 230+375+690 ГГц составляют величины $\approx 3.41 \times 10^{-6}$, 3.16×10^{-6} , 3.45×10^{-6} и 3.03×10^{-6} Ян на единичную ячейку изображения. Видно, что наилучшее значение соответствует изображению, полученному на частоте 230 ГГц с использованием МЧС и добавлением данных от двух других частот, 375 и 690 ГГц.

Следует отметить, что во всех восстановленных изображениях структура смоделированного источника прослеживается до масштабов, которые определяются не только чувствительностью интерферометра, но также и наличием малых проекций баз. В рассмотренной конфигурации космического интерферометра наименьшая проекция базы составляет ≈ 200 км. Это необходимо учитывать при рассмот-

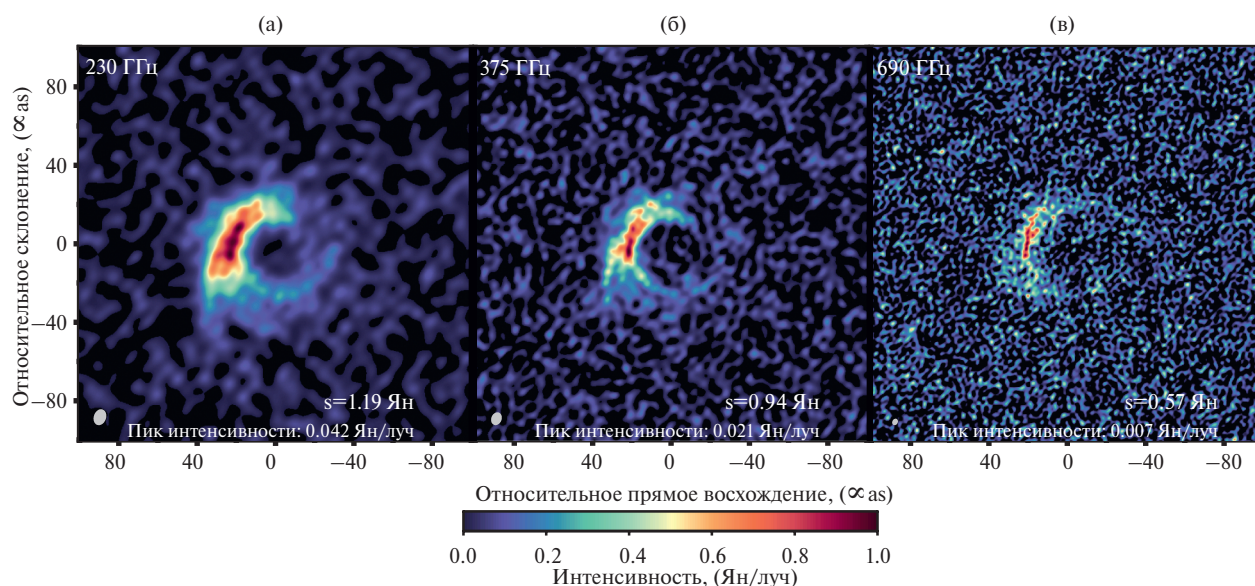


Рис. 3. Восстановленные изображения источника М87 на частотах 230 ГГц (а), 375 ГГц (б) и 690 ГГц (в). Синтезированная диаграмма направленности на каждом изображении приведена в левом нижнем углу в виде серого кружка с размерами: $7.1 \times 5.7 \mu\text{as}$, PA: -38.79° (а), $4.4 \times 3.6 \mu\text{as}$, PA: -36.47° (б), $2.4 \times 1.9 \mu\text{as}$, PA: -35.52° (в). PA — позиционный угол главной оси эллиптической синтезированной диаграммы направленности. На каждом изображении приведено значение интегрального потока S . Цветовая шкала отнормирована на пиковое значение интенсивности для каждого изображения.

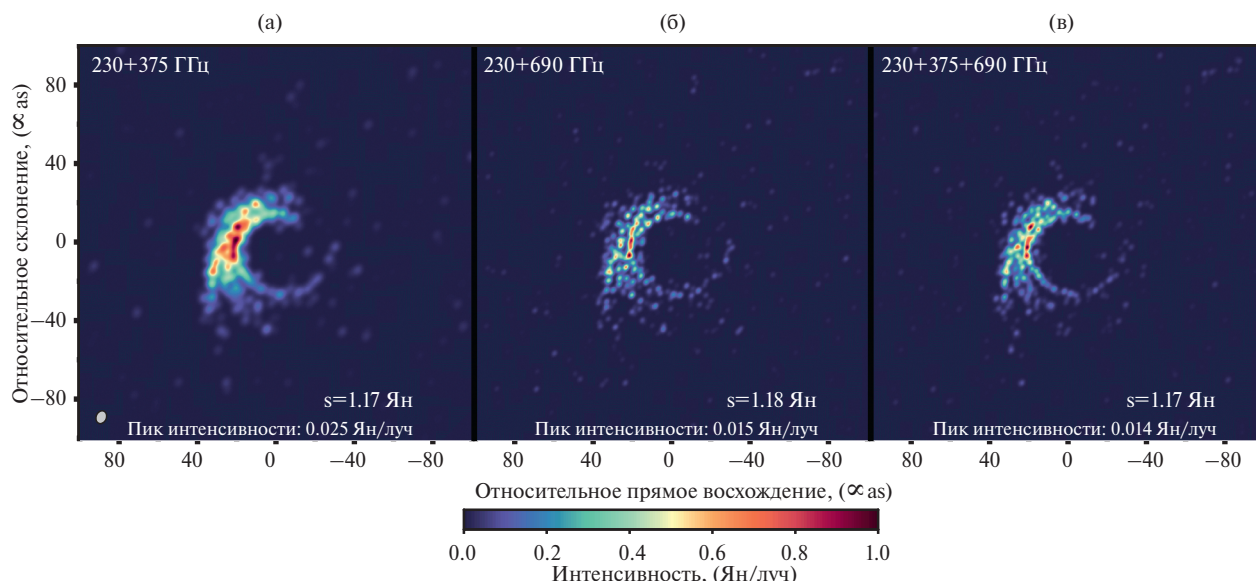


Рис. 4. Восстановленные изображения источника M87 с применением МЧС: 230+375 ГГц (а), 230+690 ГГц (б), 230+375+690 ГГц (с). Синтезированная диаграмма направленности на каждом изображении приведена в левом нижнем углу в виде серого кружка с размерами: $4.7 \times 3.8 \mu\text{as}$, PA: -35.29° (а), $3.3 \times 2.5 \mu\text{as}$, PA: -39.84° (б), $2.9 \times 2.3 \mu\text{as}$, PA: -36.62° (с). PA — позиционный угол главной оси эллиптической синтезированной диаграммы направленности. На каждом изображении приведено значение интегрального потока S . Цветовая шкала отнормирована на пиковое значение интенсивности для каждого изображения.

рении орбитальных конфигурации и планировании наблюдений в КРСДБ.

Далее восстанавливался спектр источника в широком частотном диапазоне, используя интерполяцию с помощью методов МЧС. Вычислялся интегральный поток для каждого изображения, получаемого с помощью многочастотного синтеза на промежуточных частотах с шагом 10 ГГц. На рис. 5 представлен исходный спектр (красные квадраты), который закладывался при моделировании источника, а также значения интегрального потока, восстановленные с помощью алгоритмов МЧС (серые квадраты); синими квадратами показаны интегральные потоки, полученные в смоделированных наблюдениях на частотах 230, 375 и 690 ГГц по изображениям из рис. 3. Ошибки оценок интегрального потока брались на основе неопределенности потока по рассчитанной флуктуационной чувствительности в континууме по плотности потока 5σ , что соответствует минимальному порогу детектирования сигнала интерферометром. Из-за низкой чувствительности на частоте 690 ГГц восстановленный интегральный поток в этой области спектра имеет точность ниже, чем для частот 230 и 375 ГГц, где чувствительность интерферометра выше.

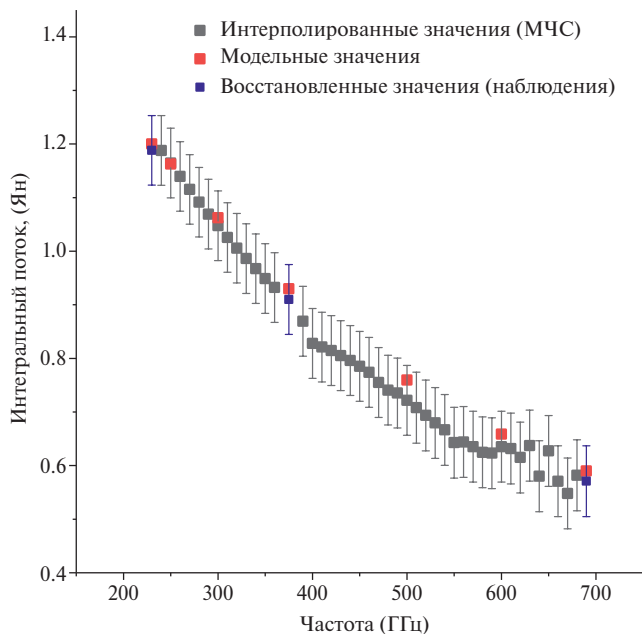


Рис. 5. Спектр смоделированного источника. Красные квадраты соответствуют интегральному потоку модели источника, синие квадраты — потоку, полученному при восстановлении изображений на частотах 230, 375 и 690 ГГц, черные квадраты — значению интегрального потока, интерполированного с помощью методов многочастотного синтеза.

Дополнительно оценивался ожидаемый поток данных в режиме многочастотного синтеза при заданных параметрах наблюдений. С полосой пропускания $\Delta\nu = 16$ ГГц и двухбитным квантованием сигнала поток данных от одного телескопа составит 32 Гбит/с или 4 Гбайт/с при наблюдениях на одной частоте, 8 Гбайт/с — на двух частотах и 12 Гбайт/с — на трех. Таким образом, при длительности наблюдений 20 часов (72 000 с) требуемый объем памяти для непрерывных наблюдений составляет ~ 289 Гбайт для одной частоты, ~ 577 Гбайт для двух частот и ~ 865 Гбайт для трех частот. В случае нехватки бортовой памяти для сохранения однородности заполнения (u, v) покрытия допустимо увеличить промежутки времени между отдельными сканами.

6. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ возможностей МЧС для КРСДБ, показал, что многочастотный синтез улучшает качество изображений. Оцененные значения среднеквадратичного отклонения для 230 ГГц показали, что есть преимущество в восстановлении изображений при добавлении данных от дополнительных, более высоких частот. Наилучшим изображением по оцененному среднеквадратичному отклонению относительно исходной модели является изображение, полученное с помощью МЧС по данным сразу трех частотных диапазонов. Отметим, что в рассмотренной конфигурации космического интерферометра минимально реализуемые проекции базы составляют ≈ 200 км, что в свою очередь может ограничивать масштабы в восстанавливаемых изображениях. Это необходимо учитывать в дальнейшем при выборе орбитальных конфигураций в КРСДБ.

Показано, что использование многочастотного синтеза позволяет восстанавливать спектральные характеристики источника в широком диапазоне. По данным трехчастотных наблюдений возможно восстановить спектр в диапазоне от 230 до 690 ГГц. В рассмотренном спектральном диапазоне модели имеют гладкий спектр со слабовыраженными неоднородностями 150 ГГц. При подобном анализе в более широком частотном диапазоне необходимо учитывать возможное наличие сильных неоднородных спектральных свойств. Точность интерполяции также будет зависеть от чувствительности интерферометра, которая напрямую влияет на отношение сигнала к шуму для восстановленных изображений на наблюдаемых частотах.

Выполненные оценки показывают, что необходимо учитывать возрастающий поток данных при использовании многочастотного синтеза. При за-

действовании трехчастотных наблюдений в указанной конфигурации генерируются потоки данных в 12 Гбайт/с (4 Гбайт/с на один частотный диапазон). Это необходимо учитывать при организации хранения на борту и передачи научных данных с космических телескопов на Землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. E. J. Lovell, H. Hirabayashi, H. Kobayashi, Y. Murata, et al., *New Astron. Rev.* 43(8–10), 515 (1999).
2. N. S. Kardashev, A. V. Alakoz, Y. Y. Kovalev, M. V. Popov, A. M. Sobolev, and K. V. Sokolovsky, *Solar System Res.* 49(7), 573 (2015).
3. N. S. Kardashev, A. V. Alakoz, A. S. Andrianov, M. I. Artyukhov, et al., *Solar System Res.* 51, 535 (2017).
4. K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, K. Asada, et al., *Astrophys. J. Letters* 875, id. L6 (2019), arXiv:1906.11243 [astro-ph.GA].
5. V. Kudriashov, M. Martin-Neira, F. Roelofs, H. Falcke, C. Brinkerink, et al., *Chin. J. Space Sci.* 41(2), 211 (2021).
6. S. F. Likhachev, A. G. Rudnitskiy, A. S. Andrianov, M. N. Andrianov, et al., *Cosmic Research* 62(1), 117 (2024).
7. A. G. Rudnitskiy, M. A. Shchurov, S. V. Chernov, T. A. Syachina, and P. R. Zapevalin, *Acta Astronautica* 212, 361 (2023), arXiv:2305.19072 [astro-ph.IM].
8. H. Falcke, F. Melia, and E. Agol, *Astrophys. J. Letters* 528(1), L13 (2000), arXiv:astro-ph/9912263.
9. J. Dexter, J. C. McKinney, and E. Agol, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 421(2), 1517 (2012), arXiv:1109.6011 [astro-ph.HE].
10. R. C. Jennison, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 118, 276 (1958).
11. A. A. Chael, M. D. Johnson, K. L. Bouman, L. L. Blackburn, K. Akiyama, and R. Narayan, 857(1), id. 23 (2018).
12. S. T. Han, J. W. Lee, J. Kang, C. S. Oh, et al., in *Proc. of the 11th European VLBI Network Symposium & Users Meeting*, held 9–12 October (2012), Bordeaux (France), <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=178>, id. 59.
13. D. Palumbo, M. Johnson, S. Doeleman, A. Chael, and K. Bouman, *Amer. Astron. Soc., AAS Meeting. Abstracts* #231 (2018), p. 347.21.
14. N. S. Kardashev, I. D. Novikov, V. N. Lukash, S. V. Pilipenko, et al., *Physics Uspekhi* 57, 1199 (2014), arXiv:1502.06071 [astro-ph.IM].
15. A. S. Andrianov, A. M. Baryshev, H. Falcke, I. A. Girin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 50094, 4866 (2021), arXiv:2006.10120 [astro-ph.GA].

16. *S. F. Likhachev, A. G. Rudnitskiy, M. A. Shchurov, A. S. Andrianov, A. M. Baryshev, S. V. Chernov, and V. I. Kostenko*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 511(1), 668 (2022), arXiv:2108.03077 [astro-ph.GA].
17. *A. Rudnitskiy, M. Shchurov, T. Jung, and M. Giroletti*, J. Korean Astron. Soc. 56, 91 (2023).
18. *S. Likhachev, V. Ladygin, and I. Guirin*, in Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII, Proc. of the conference held 12–15 October, 2003 in Strasbourg, France; edited by F. Ochsenbein, M. G. Allen, and D. Egret (San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 2004), ASP Conf. Proc. 314, p. 543.
19. *S. F. Likhachev, I. A. Girin, V. Y. Avdeev, A. S. Andrianov, et al.*, Astron. and Comput. 33, id. 100426 (2020).
20. *J.-C. Algaba, G.-Y. Zhao, S.-S. Lee, D.-Y. Byun, et al.*, J. Korean Astron. Soc. 48, 237 (2015), arXiv:1510.05817 [astro-ph.IM].
21. *S. F. Likhachev, V. I. Kostenko, I. A. Girin, A. S. Andrianov, A. G. Rudnitskiy, and V. E. Zharov*, J. Astron. Instrument. 6(3), id. 1750004–131 (2017), arXiv:1706.06320 [astro-ph.IM].
22. *S. Trippe, T. Jung, J.-W. Lee, J. Wagner, et al.*, arXiv:2304.06482 [astro-ph.IM] (2023).
23. *S. V. Chernov*, Astron. Rep. 65, 110 (2021).

MULTI-FREQUENCY SYNTHESIS IN SPACE VERY LONG BASELINE RADIO INTERFEROMETRY

A. G. Rudnitskiy¹, M. A. Shchurov¹, S. V. Chernov¹

¹*Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The paper examines the possibilities of using multi-frequency synthesis methods for very long baseline (VLBI) space radio interferometers to improve the (u,v) coverage and the quality of the resulting synthesized images. To evaluate the contribution of multi-frequency synthesis methods, simulations of VLBI observations were performed using the example of the space VLBI concept that is based on a combination of circular near-Earth orbits.

Keywords: interferometry, VLBI, supermassive black holes