

УДК 520.272.22

Радиотелескоп миллиметрового диапазона РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана: состояние и перспективы развития

В.В. Смирнова¹, В.Б. Хайкин², Г.А. Макоев², В.С. Рыжов³

¹ ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым
vsvvid.smirnova@yandex.ru

² Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Пулковское ш., 65, Санкт-Петербург, 196140, Россия
v_vkhstu@mail.ru

³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия
v_vsryzhov@mail.ru

Поступила в редакцию 6 октября 2023 г.

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования многолучевого режима работы радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Предложена концепция бюджетных матричных приемников для длин волн 3 и 2 мм, которые позволят многократно уменьшить время построения полной карты солнечного диска. Приводятся результаты моделирования ожидаемых изображений солнечных субтерагерцовых вспышек с положительным наклоном спектра на длинах волн 3 и 2 мм.

Ключевые слова: Солнце, радиотелескоп, многолучевой режим работы, матричные приемники, солнечные вспышки, миллиметровое радиоизлучение

1 Введение

Одной из важных научных задач миллиметрового (ММ) радиодиапазона является исследование солнечных вспышек, при которых происходит мощное энерговыделение, ускорение частиц и выбросы плазмы, что может значительно влиять на состояние межпланетного пространства и магнитного поля Земли.

Особенно интересной задачей для ММ радиодиапазона данного класса является изучение солнечных субтерагерцовых (суб-ТГц) вспышек, при которых происходит мощное энерговыделение, ускорение частиц и выбросы плазмы, что может значительно влиять на состояние межпланетного пространства и магнитного поля Земли. Эта задача актуальна, так как в настоящее время данные наблюдений вспышек в диапазоне длин волн 2–4 мм весьма редки и неоднородны (Смирнова и др., 2016). При этом они могут содержать уникальную информацию о характеристиках потоков высокоэнергичных электронов с энергиями > 1 МэВ, физических параметрах плазмы и положении источника энерговыделения вспышки. К тому же природа излучения солнечных суб-ТГц вспышек с положительным наклоном спектра до конца не ясна (Tsap et al., 2016).

Получение на РТ-7.5 карт распределения интенсивности радиоизлучения солнечного диска в результате сканирования занимает 5–8 минут. Такие карты важны для исследований долгопериодических вариаций спокойной хромосферы, но не пригодны для изучения нестационарных вспышечных процессов, протекающих обычно в пределах нескольких минут. Поэтому важной задачей является возможность максимально быстрого получения карт солнечного диска без потери времени на сканирование.

Цель представленной работы – изучить возможность работы РТ-7.5 в многолучевом режиме с матричным приемником во вторичном фокусе, а также промоделировать ожидаемые изображения солнечных суб-ТГц вспышек на длинах волн 3 и 2 мм (93 и 140 ГГц) при использовании предложенных вариантов матричных приемников. Решение данной задачи представляет как астрофизический,

так и методический интерес, в частности для задач, связанных с отладкой матричных режимов работы ММ телескопа. Такие методы предлагается применять на Евразийских субмиллиметровых телескопах (ESMT) (Khaikin et al., 2020), используя РТ-7.5 как лабораторию для поиска оптимальных путей решения данной задачи.

2 Основные характеристики радиотелескопа РТ-7.5

2.1 Система облучения

Радиотелескоп РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана предназначен для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн (1–4 мм) и стоит в одном ряду с крупными солнечными радиотелескопами этого диапазона (Шустиков и др., 2012). Радиотелескоп расположен вблизи г. Дмитров Московской области. Антенна диаметром 7.75 м оснащена двухчастотной приемной аппаратурой, установленной в настоящее время в первичном фокусе, позволяющей одновременно вести наблюдения на длинах волн 3.2 и 2.2 мм (93 и 140 ГГц) при ширине лучей диаграммы направленности $2.5'$ и $1.5'$ соответственно. Высокоточный синхронно-следающий привод обеспечивает слежение за астрономическими объектами. Высокая флуктуационная чувствительность приемной аппаратуры (0.1 К по яркостной температуре и 0.01 с.е.п. по потоку), а также высокое временное разрешение (0.125 с) позволяют решать ряд актуальных научных задач, главной из которых является исследование хромосферы Солнца (Шустиков и др., 2015).

На антенне РТ-7.5 возможны две системы облучения – из первичного и вторичного фокуса. Решение о переходе к двухзеркальной системе облучения антенны РТ-7.5 было принято в связи с разработкой двухдиапазонного приемника радиотелескопа. Угол облучения зеркала из первичного фокуса $2\phi\nu = 120^\circ$ (рис. 1), что не позволяет использовать квазиоптические методы для совмещения пучков диапазонов длин волн 2.2 и 3.2 мм на оси главного зеркала радиотелескопа.

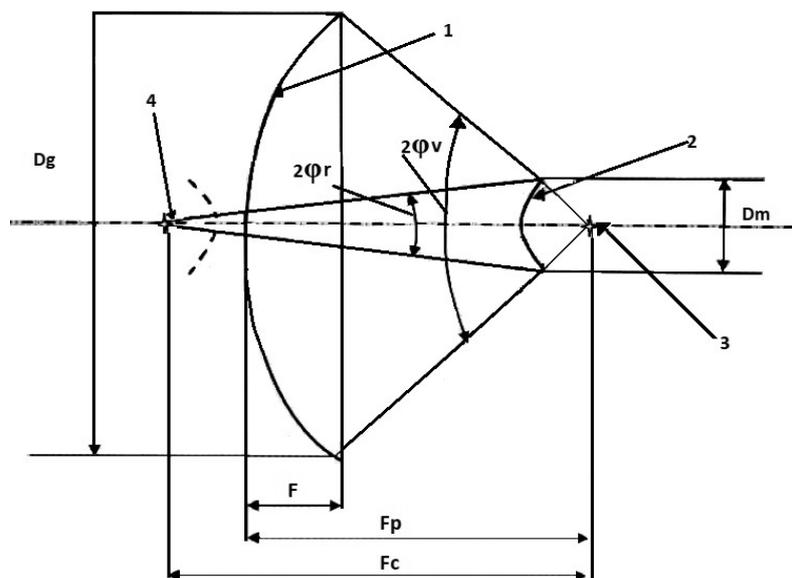


Рис. 1. Схема облучения радиотелескопа РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана из вторичного фокуса

Детальная схема облучения РТ-7.5 представлена на рис. 1. Здесь: 1 – основное зеркало, 2 – контррефлектор, 3 – положение первичного фокуса, 4 – положение вторичного фокуса. Буквенными обозначениями представлены: $D_g = 7.75$ м – диаметр главного зеркала, $F_p = 3.25$ м – фокус параболоида вращения, $F_c = 3.75$ м – расстояние между фокусами гиперболы, F – глубина чаши основного зеркала, $D_m = 600$ мм – диаметр контррефлектора.

Выбранная двухзеркальная схема Кассегрена удовлетворяет требованиям по расходимости пучков первичных облучателей, приводит к снижению шумовой температуры антенны и дает возможность разместить приемники двух диапазонов вблизи вторичного фокуса, расположенного за главным зеркалом. Она предполагает использование гиперболического отражателя (контррефлектора)

в качестве второго зеркала, который совместно с параболическим первичным зеркалом формирует плоский фазовый фронт электромагнитной волны. Угол облучения контррефлектора из вторичного фокуса составляет $2\phi_r = 8^\circ$, что дает для антенной системы увеличение $M = 15$.

2.2 Качество отражающей поверхности и коэффициент усиления антенны радиотелескопа РТ-7.5

Ошибки отражающей поверхности параболических антенн являются основным источником снижения их эффективности и определяют минимальную длину волны, на которой они могут эффективно работать. Они имеют различную природу и пространственный масштаб и по-разному влияют на электрические характеристики антенны. Весовые крупномасштабные деформации функционально связаны с наклоном антенны по углу места, тепловые крупномасштабные деформации – с ориентацией антенны относительно Солнца, градиентами окружающей температуры и ферменного каркаса, а мелкомасштабные деформации – с градиентами температур на самих панелях. Вследствие этих ошибок возникают искажения формы диаграммы направленности, рост боковых лепестков, а также потеря коэффициента усиления. Ошибки изготовления панелей обычно являются мелкими и случайными. Кроме того, следует учитывать ошибки взаимной привязки панелей. Указанные ошибки поверхности приводят к увеличению рассеяния в дальние боковые лепестки и общему снижению коэффициента усиления антенн G . Это снижение, согласно формуле Рузе (Ruze, 1966), носит экспоненциальный характер:

$$G = G_0 \exp\left(\frac{-4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2, \quad (1)$$

где $G_0 = \left(\frac{\epsilon_0 \pi^2 D_g^2}{\lambda}\right)^2$ – коэффициент усиления той же антенны с идеально точной поверхностью; σ – средняя квадратичная погрешность поверхности; λ – длина волны. Апертурный коэффициент ϵ_0 связан с затенением, неравномерностью облучения, недооблучением/переоблучением антенны и т. д. (у правильно облучаемых антенн ϵ_0 не менее 0.75). Однако приведенная выше широко применяемая формула Рузе имеет ряд ограничений, в частности, она не учитывает следующие обстоятельства:

- поверхностные погрешности антенны носят случайный характер и равномерно распределены по апертуре;
- поверхностные ошибки распределены в фиксированных областях круговой корреляции;
- апертура антенны значительно больше возможного радиуса корреляции ошибок C , связанного с размером панелей ($D_g \gg 2C$);
- поверхностные ошибки имеют гауссову пространственную фазовую корреляцию.

Кроме того, при произвольном F_p/D_g нужно учитывать корректирующий множитель Рузе A , входящий в показатель экспоненты уравнения $\frac{G}{G_0} = e^{-A(4\pi\sigma/\lambda)^2}$ мультипликативно, где значение $A = 0.8-1.0$ при $F_p/D_g = 0.4-1.0$ (Ruze, 1966).

Поскольку с уменьшением длины волны G_0 растет как λ^2 , и в то же время второй множитель в (1) уменьшается по экспоненциальному закону, существует длина волны λ_0 , на которой усиление антенны максимально.

На рис. 2 представлены результаты измерения среднеквадратичной ошибки (СКО) поверхности антенны РТ-7.5, полученные методами лазерной геодезии, с помощью приборов, которые ранее были успешно испытаны в сотрудничестве с ООО «Нева Технолоджи» на параболическом вторичном зеркале радиотелескопа РАТАН-600 с СКО = 0.31 мм (Khaikin et al., 2013).

Сканирование поверхности РТ-7.5 производилось бесконтактно с помощью радара MV 224 и сканера Z+F IMAGER.

Результаты сканирования радаром MV 224 (рис. 2а):

- теоретическое фокусное расстояние – 3250 мм; фокусное расстояние, полученное по результатам сканирования – 3253 мм;
- СКО всей поверхности параболоида – 0.34 мм;
- СКО центральной части поверхности параболоида с диаметром 5 м – 0.16 мм. Максимальные отклонения от поверхности параболоида – до 2 мм (белая зона на картограмме отклонений).

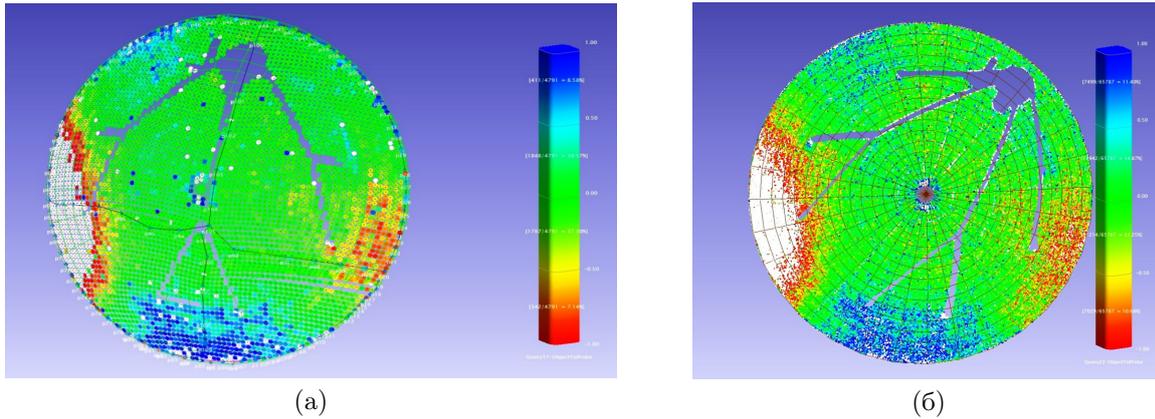


Рис. 2. Результаты измерения СКО поверхности антенны РТ-7.5. (а) измерения радаром MV 224; (б) измерения лазером Z+F IMAGER

Результаты сканирования сканером Z+F IMAGER (рис. 2б):

- теоретическое фокусное расстояние – 3250 мм; фокусное расстояние, полученное по результатам сканирования – 3252.80 мм;
- СКО всей поверхности параболоида – 0.37 мм. Максимальные отклонения от поверхности параболоида – до 2 мм (белая зона на картограмме отклонений).

Зная СКО поверхности антенны РТ-7.5, рассчитаем минимальную длину волны, на которой усиление антенны будет максимальным, для полной апертуры и ее центральной части (5 м). Для этого построим $G(\lambda)$ с учетом измеренной СКО поверхности полной апертуры и ее центральной части (рис. 3).

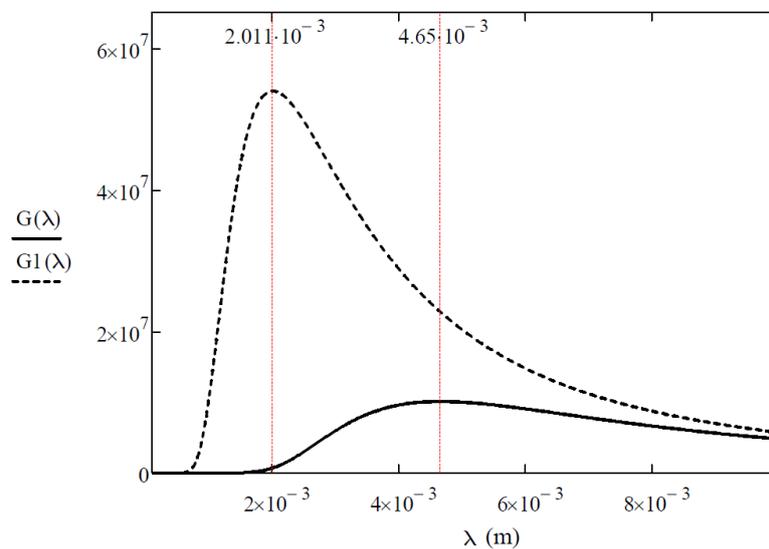


Рис. 3. Результаты расчета $G(\lambda)$ и СКО = 0.34 мм для всей антенны РТ-7.5, а также $G1(\lambda)$ и СКО = 0.16 мм для ее центральной части

Видно, что для полной апертуры максимальное усиление $G(\lambda)$ будет наблюдаться на длине волны 4.6 мм, тогда как при использовании центральной части главного зеркала максимальное усиление $G1(\lambda)$ будет достигнуто на длине волны ~ 2 мм. Это объясняет причину того, что на РТ-7.5 облучается в настоящее время только центральная часть апертуры, что дает максимальное значение G , но приводит к существенному снижению полуширины диаграммы направленности антенны (ДН) на обеих длинах волн.

2.3 Расчетная и экспериментальная диаграммы направленности антенны РТ-7.5

Приемная аппаратура радиотелескопа РТ-7.5 представлена двумя радиометрами на частотах 93 и 140 ГГц. Для расчета ДН РТ-7.5 на данных частотах был применен метод прямого интегрирования апертурного поля, ранее описанный в работе Хайкин, Макоев (2023). Результаты расчета ДН приведены на рис. 4. Видно, что по уровню -3 дБ ДН довольно узкие и их ширины составляют 1.6 и 1.1 угл. мин на частотах 93 и 140 ГГц соответственно. Расчет ДН выполнялся для полной апертуры антенны с оптимальным облучением.

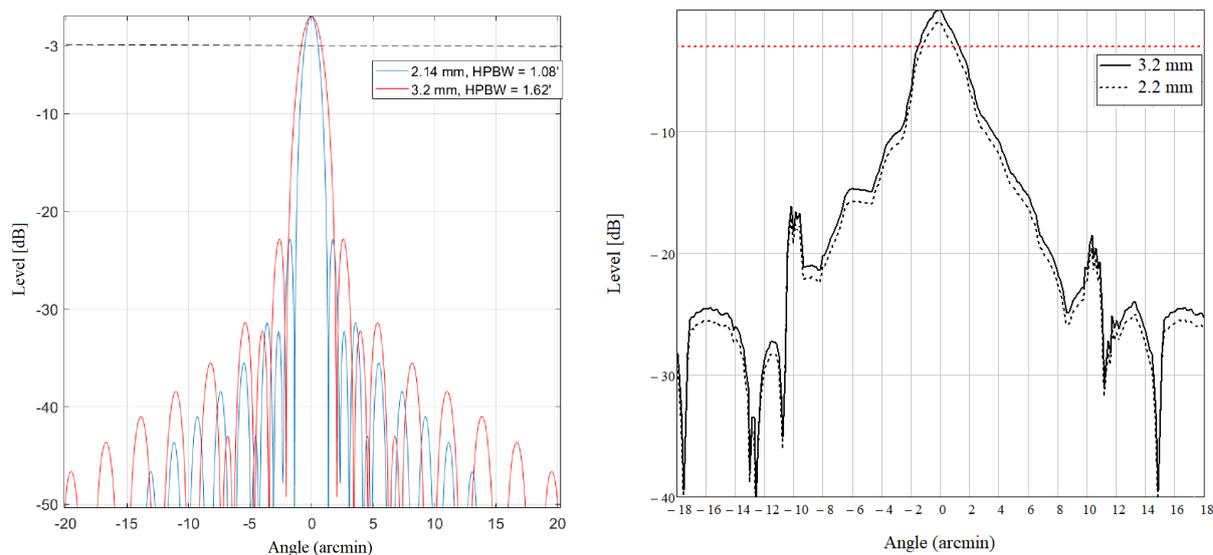


Рис. 4. Слева – расчетная ДН антенны РТ-7.5 для двух длин волн, справа – измеренная по Солнцу ДН антенны РТ-7.5. Горизонтальная пунктирная линия на обоих рисунках соответствует уровню -3 дБ

На рис. 4 справа показана измеренная по Солнцу диаграмма направленности антенны, которая на обеих частотах составляет $\sim 2.5'$. Измерения проводились в 2019 году методом обработки солнечных карт. Сплошная и пунктирная линии – ДН на частотах 93 и 140 ГГц соответственно. Более широкая, в сравнении с расчетной, ДН РТ-7.5 является следствием недооблучения раскрыва главного зеркала из-за значительных краевых деформаций.

3 Моделирование многолучевых ДН РТ-7.5 и ожидаемых изображений суб-ТГц вспышек на Солнце

Как уже было отмечено, время сканирования диска Солнца (построения полной карты во время наблюдений) на РТ-7.5 сейчас составляет 5–8 минут, что недостаточно для исследования нестационарных вспышечных процессов, которые могут протекать в пределах нескольких минут (Рыжов и др., 2023). При слежении же за какой-то одной локальной активной областью (АО) остаются без внимания другие АО, в которых может происходить динамика, приводящая к вспышке. Соответственно, как при сканировании, так и при слежении за областью теряется важная часть информации о поведении суб-ТГц излучения.

Для развития приемной аппаратуры РТ-7.5 можно применить матричные приемники, которые активно используются в современной радиоастрономии и позволяют не использовать метод сканирования. При этом изображение исследуемого объекта получается практически мгновенно. Однако существенным недостатком матричного приемника является его дороговизна, связанная с большим числом приемных элементов, каждый из которых представляет собой компактный радиометр с компактным рупором. Поэтому для РТ-7.5 предложен более бюджетный вариант плотно упакованной двухрядной матрицы. При этом время сканирования Солнца по одной координате с такой матрицей составит 1–2 с.

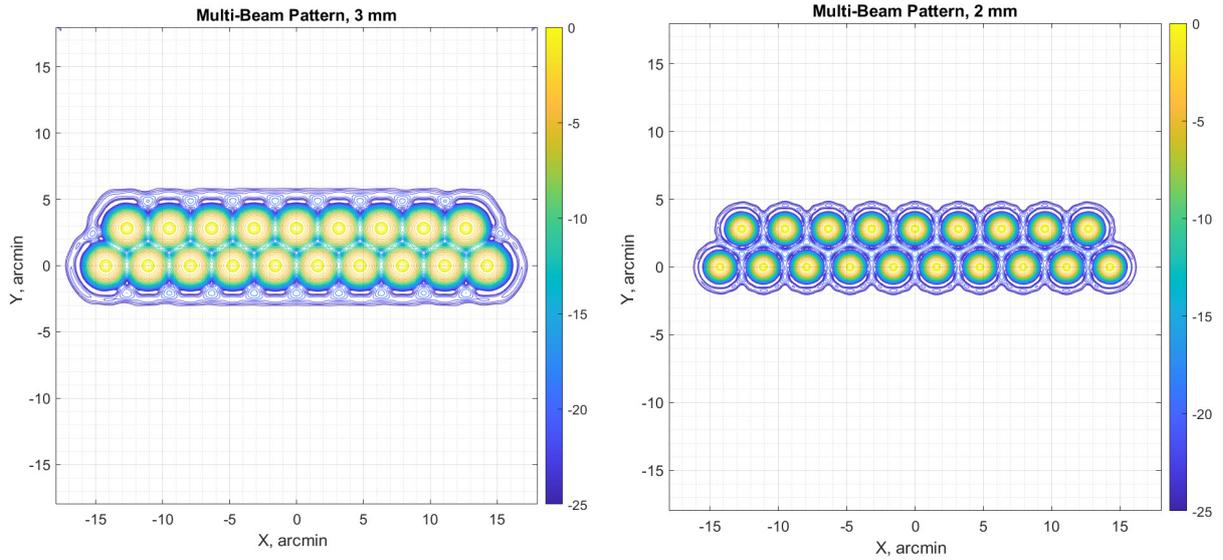


Рис. 5. Расчетные двумерные ДН РТ-7.5 для двухрядных матриц 10 + 9 лучей. Слева – для длины волны 3.2 мм, справа – для длины волны 2.2 мм

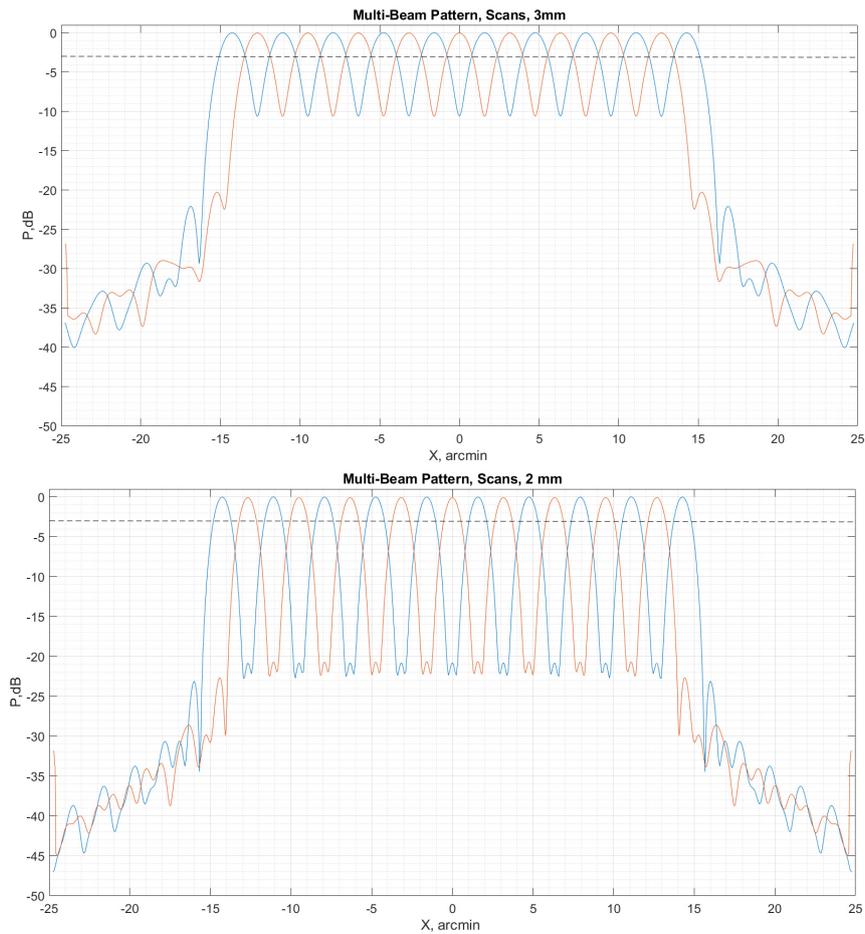


Рис. 6. Расчетные одномерные ДН РТ-7.5 для двухрядных матриц 10+9 лучей. Сверху – для длины волны 3.2 мм, снизу – для длины волны 2.2 мм

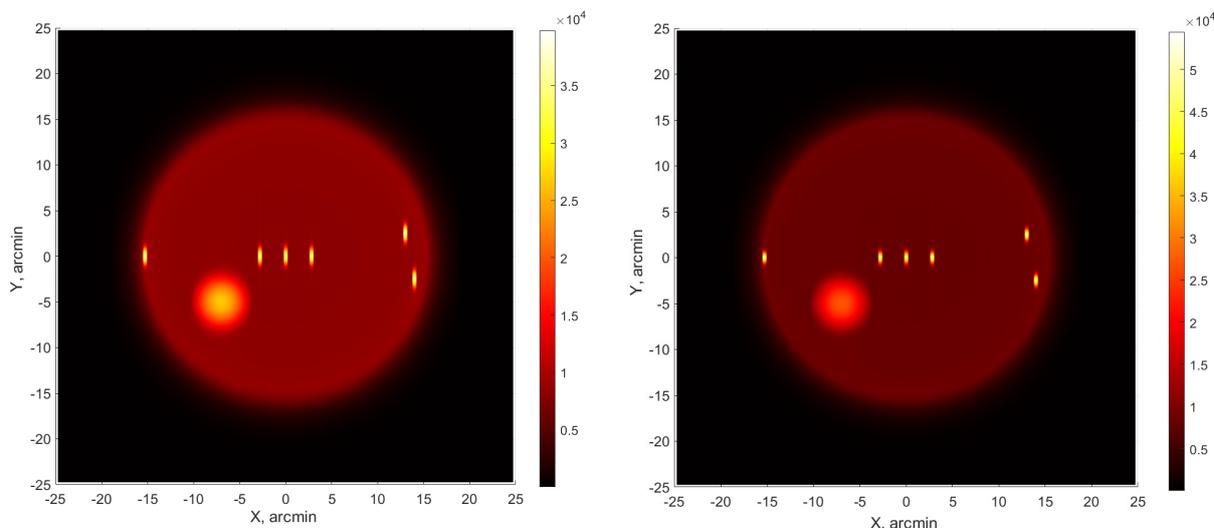


Рис. 7. Свертки модели Солнца с расчетными многолучевыми ДН. Слева – для длины волны 3.2 мм, справа – для длины волны 2.2 мм

Методом, описанным в работе [Хайкин, Макоев \(2023\)](#), выполнено моделирование многолучевых ДН РТ-7.5 с двухрядными матрицами $10 + 9$ элементов, размещенными во вторичном фокусе. Расчетные многолучевые ДН РТ-7.5, получаемые с такими матрицами, представлены на рис. 5 и 6. Как и следовало ожидать, при таком размере матрицы внеосевые aberrации ДН в двухзеркальной схеме Кассегрена с увеличением $M \sim 15$ перестают быть видимыми. В работе [Хайкин, Макоев \(2023\)](#) также показано, что при $M = 12.5$ не только кома, но и другие полевые aberrации незначительны, кроме кривизны поля изображения, которая ограничивает возможности использования плоских волноводных матриц размером 9×9 элементов на длине волны 1 мм и короче.

Была выполнена свертка модели Солнца с рассчитанными многолучевыми ДН для оценки качества получаемых изображений при быстром сканировании диска Солнца. В модель закладывались достаточно компактные относительно полуширины ДН локальные источники (не больше размеров ДН) и источник в виде диска размером $4'$, соответствующий типовой АО, а также источники в форме вспыхивающих лент площадью около 1000 (угл. сек)². Следуя работе [Kontar et al. \(2018\)](#), предполагалось, что источником теплового суб-ТГц излучения солнечных вспыхивающих лент с положительным наклоном спектра могут являться вспыхивающие ленты с температурой 10^4 – 10^6 К. В качестве спокойного Солнца задавался равномерный по интенсивности диск с уярчением на лимбе ([Боровик, 1997](#)). Яркостная температура спокойного Солнца задавалась по формуле $T_b = 5950 \cdot \lambda^{0.16}$ ([Пелюшенко, 1982](#)).

На рис. 7 приведены результаты свертки модели Солнца, включающей компактные оптически толстые источники ($T_b = T = 10^5$ К) и АО ($T_b = T = 3 \times 10^4$ К), с ранее полученными идеализированными многолучевыми ДН РТ-7.5 (без учета ошибок поверхности) для двухрядной матрицы. На ожидаемых изображениях четко видны яркие компактные источники и АО в виде диска. Вытянутость изображений компактных источников с круговой симметрией по вертикали отражает результат их свертки по вертикали с двумерной ДН РТ-7.5.

4 Выводы

Радиотелескоп РТ-7.5 сегодня проводит эффективные исследования солнечной активности в коротком ММ диапазоне волн. Одним из ограничений изучения нестационарных процессов на Солнце на РТ-7.5 является медленное построение карт диска Солнца в однолучевом режиме.

Выполнено моделирование многолучевого режима работы РТ-7.5. Из полученных результатов видно, что матричные приемники значительно повысят эффективность работы радиотелескопа РТ-7.5. При этом время сканирования Солнца по одной координате составит 1–2 с, что даст возможность

исследовать динамику всех активных областей, наблюдаемых на солнечном диске, и приведет к обнаружению гораздо большего числа суб-ТГц событий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-52-26006 Чехия_а (В.В. Смирнова) и гранта РНФ 23-72-00041 (Г.А. Макоев), а также при частичной поддержке Минобрнауки НИР № 1021051101548-7-1.3.8.

Литература

- Боровик В.Н., 1997. Исследование спокойного Солнца в микроволновом диапазоне на радиотелескопах РАТАН-600 и БПР в XX-XXII циклах солнечной активности (Дисс. док. физ.-матем. наук). Нижний Архыз: Астрофизика, радиоастрономия. [Borovik V.N., 1997. Study of the quiet Sun in the microwave range on the RATAN-600 and BPR radio telescopes in the XX-XXII solar activity cycles, PhD thesis. Nizhniy Arkhyz: Astrofizika, radioastronomiya. (In Russ.)]
- Пелюшенко С.А., 1982. Известия высших учебных заведений. Радиофизика. Т. 25. № 11. С. 1269. [Pelyushenko S.A., 1982. *Radiophys. Quantum. Electron.*, vol. 25, no. 11, pp. 906–913.]
- Рыжов В.С., Шиврина П.В., Смирнова В.В., 2023. *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* Т. 119. № 1. С. 11. [Ryzhov V.S., Shivrina P.V., Smirnova V.V., 2023. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ.*, vol. 119, no. 1, pp. 11–18. (In Russ.)]
- Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Шумов А.В., Моргачев А.С., Моторина и др., 2016. Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 12. С. 85. [Smirnova V.V., Tsap Y.T., Shumov A.V., Morgachev A.S., Motorina G.G., et al., 2016. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman*, no. 12, pp. 85–97. (In Russ.)]
- Хайкин В.Б., Макоев Г.А., 2023. Труды ИПА РАН, в печати. [Khaikin V.B., Makoev G.A., 2023. *Trudy IPA RAN*, in press. (In Russ.)]
- Шустиков В.Ю., Шумов А.В., Рыжов В.С., Жильцов А.В., 2012. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. № 7. С. 277. [Shustikov V.Y., Shumov A.V., Ryzhov V.S., Zhiltsov A.V., 2012. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman*. *Priborostroenie*, no. 7, pp. 277–288. (In Russ.)]
- Шустиков В.Ю., Шумов А.В., Цап Ю.Т., Жаркова Н.А., Моргачев А.С. и др., 2015. Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 9. С. 106. [Shustikov V.Y., Shumov A.V., Tsap Y.T., Zharkova N.A., Morgachev A.S., et al., 2015. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman*, no. 9, pp. 106–121. (In Russ.)]
- Khaikin V.B., Bursov N.N., Viktoruk D.G., Druzinin M.Y., Yakovlev S.V., Kornev A.V., 2013. Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation, pp. 4090–4099.
- Khaikin V., Lebedev M., Shmagin V., Zinchenko I., Vdovin V., et al., 2020. Proceedings of the 7th All-Russian Microwave Conference, pp. 47–51.
- Kontar E.P., Motorina G.G., Jeffrey N.L.S., Tsap Y.T., Fleishman G.D., Stepanov A.V., 2018. *Astron. Astrophys.*, vol. 620, id. A95, pp. 1–6.
- Ruze J., 1966. Proceedings of the IEEE, vol. 54, no. 4, pp. 633–640.
- Tsap Yu.T., Smirnova V.V., Morgachev A.S., Motorina G.G., Kontar E.P., et al., 2016. *Advances in Space Research*, vol. 57, iss. 7, pp. 1449–1455.

Millimeter-wave radio telescope RT-7.5 BMSTU: status and development prospects

*V.V. Smirnova*¹, *V.B. Khaikin*², *G.A. Makoev*², *V.S. Ryzhov*³

¹ Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409

vsvvid.smirnova@yandex.ru

² Special Astrophysical Observatory RAS (Saint-Petersburg department), Pulkovskoe sh. 65, Saint Petersburg 196140, Russia

v_vkhstu@mail.ru

³ Bauman Moscow State Technical University, 2-nd Baumanskaya 5, Moscow 105005, Russia

v_vsryzhov@mail.ru

Abstract. The paper describes the characteristics and current state of the millimeter-wave radio telescope RT-7.5 operated by Bauman Moscow State Technical University. The multi-beam operating mode modeling results are presented for RT-7.5. A concept of low-cost matrix receivers for 3 and 2 mm waves is proposed, which will greatly reduce the time to produce solar maps. The expected model images of solar subterahertz flares with a positive spectral slope at 3 and 2 mm are presented.

Key words: Sun, radio telescope, multi-beam operating mode, matrix receivers, solar flares, millimeter radio emission, chromosphere