

УДК 520.272.22:523.9; 520.274:523.9

## РАДИОГЕЛИОГРАФЫ И РАДИОРЕФЛЕКТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

© 2019 В. Б. Хайкин<sup>1\*</sup>, А. А. Стороженко<sup>1</sup>, В. М. Богод<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационной техники, механики и оптики, Санкт-Петербург, 197101 Россия

Поступила в редакцию 13 апреля 2017 года; после доработки 23 ноября 2018 года; принята к публикации 23 ноября 2018 года

В работе рассматриваются характеристики крупных интерферометров и рефлекторных радиотелескопов для исследования радиоизлучения солнечной атмосферы. Создание солнечных радиointерферометров (радиогелиографов) оказалось более рентабельным, чем одиночных рефлекторных радиотелескопов, поскольку использование апертурного синтеза позволило быстро и с лучшим пространственным разрешением строить изображения Солнца и его активных областей и эффективно изучать взрывные процессы на Солнце. При этом исследования, затрагивающие многие фундаментальные вопросы физики солнечной атмосферы, где требуется изучение слабоконтрастных структур до и после вспышек, к сожалению, не получили соответствующего развития. Повышение эффективности работы радиорефлекторов в последние десятилетия происходило главным образом благодаря развитию матричных методов приема, фокальных решеток, а также спектральному анализу в широком диапазоне длин волн с высокой чувствительностью по потоку излучения. Между тем разнообразие задач физики солнечной атмосферы и активных процессов требует оптимального применения возможностей различных интерферометрических и рефлекторных систем микроволнового диапазона для совместных исследований Солнца. В связи с началом реализации программ наблюдений Солнца на новом инструменте ALMA и появлением новых наблюдательных данных в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах обсуждаются направления развития солнечных исследований на радиотелескопе РАТАН-600 в широком диапазоне длин волн.

Ключевые слова: Солнце: радиоизлучение — инструменты: интерферометры — телескопы

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы инструментарий для исследования радиоизлучения Солнца значительно изменился. Проект Frequency Agile Solar Radiotelescope (FASR) [1] стимулировал создание нескольких радиогелиографов — Китайский спектральный радиогелиограф (Chinese Spectral Radioheliograph (CSRH)), Mingantu Spectral Radioheliograph (MUSER)), Expanded Owens Valley Solar Array (EOVSA), Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ) (Сибирский радиогелиограф (СРГ)) — для работы в метровом (м), дециметровом (дм) и сантиметровом (см) диапазонах. Актуальность значительных инструментальных затрат была обусловлена необходимостью исследования процессов во вспышечно-активной плазме на высотах переходной зоны хромосфера—корона и до высот образования солнечного ветра [2–4]. Наблюдения на новом уникальном инструменте

Atacama Large Millimeter Array (ALMA) [5] для исследований в терагерцовом диапазоне позволяют проникать в физику явлений в более глубоких слоях хромосферы, в которых происходит преобразование тепловой энергии в нетепловую энергию вспышечных процессов. Перечисленные выше инструменты используют интерферометрические методы формирования изображений. Рефлекторные методы построения радиоизображений применяются в различных режимах работы одиночных полноповоротных параболических зеркал, земляных чаш и антенн переменного профиля (АПП) [6–10]. Сочетание наблюдений ярких компактных структур на радиогелиографах и протяженных слабоконтрастных структур с помощью радиорефлекторов позволяет воссоздать полную структуру активной области в микроволновом диапазоне на корональных и более низких уровнях атмосферы Солнца.

Физика Солнца в последние десятилетия переживает бурный прогресс. Он обусловлен главным

\*E-mail: vkhstu@mail.ru

образом большими потоками регулярной информации, поступающей с космических телескопов в ЭУФ и рентгеновском спектральных диапазонах и обширными исследованиями на наземных радиотелескопах в м-, дм- и см-диапазонах. Усилиями радиоастрономов реализуются новые проекты радиогелиографов, которые направлены на ликвидацию их главного недостатка, связанного с одноволновостью (например, 5.2 см на ССРТ [3]) или двухволновостью (1.6 см и 0.8 см — Nobeyama Radioheliograph (NoRH) [4]). Сегодня крупные рефлекторные инструменты практически не используются в регулярных наблюдениях Солнца. Исключением является радиотелескоп РАТАН-600, на котором регулярные многоволновые наблюдения Солнца проводятся с 1975 г. Стоит также отметить вклад ранних наблюдений на 100-м радиотелескопе в Бонне [6] в диапазоне до 8 мм и наблюдения Солнца на 45-м радиотелескопе в Nobeyama с пространственным разрешением  $46''$  на 36 ГГц и  $17''$  на 98 ГГц [7] в середине 80-х годов. Карты Солнца этих наблюдений с высоким пространственным разрешением впервые подтвердили существование тонких уярчений, связанных с полярными корональными дырами, и дали новую информацию о структуре активных областей.

Рефлекторные радиотелескопы меньших размеров выполняют регулярные наблюдения Солнца в мм-диапазоне. Это в первую очередь 14-м телескопы в Метсахови (Финляндия), 13.7-м в Итапетинга (Бразилия) и РТ-22 в Крыму [8]. Однако, поскольку Солнце является переменным объектом и исследование его активности требует регулярных, желательных ежедневных многочасовых наблюдений, это вызывает трудности при совмещении с другими программами на крупных инструментах. Благодаря многопрограммности радиотелескопа РАТАН-600 [9, 10], такие сложности не возникают.

В исследовании активной солнечной атмосферы значительный вклад вносят регулярные наблюдения на радиогелиографах NRH (Nançay, Франция) [2], ССРТ [3], NoRH (Япония) [4]. Однако отсутствие полного анализа спектра в м-, дм- и см-диапазонах побудило радиоастрономов разрабатывать новые проекты на основе радиогелиографов, таких как FASR (США) [1], мССРТ в Иркутске [11] и CSRH в Китае [12]. Главное назначение этих инструментов связано с изучением вспышечных процессов и механизмов генерации мощных событий на Солнце.

Следует признать высокую эффективность новых радиогелиографов как более дешевого способа повышения пространственного двумерного разрешения по сравнению с рефлекторными радиотелескопами. Интерферометры с использованием апертурного синтеза много быстрее и с лучшим

пространственным разрешением строят изображения Солнца и его активных областей, хотя и в ограниченной полосе в сравнении с крупным одиночным радиотелескопом в режиме сканирования. С другой стороны, в рефлекторных радиотелескопах реализованы моментальные полосы в 4–5 октав [9], тогда как достижение моментальных полос в 1–2 октавы для современных радиогелиографов представляет пока большую техническую проблему [5].

Опыт использования крупных радиоинструментов для многих задач физики Солнца указывает на необходимость оптимального использования возможностей радиогелиографов и рефлекторов. В настоящей работе мы рассматриваем характеристики этих инструментов с учетом специфики задач солнечной радиоастрономии.

## 2. СПЕЦИФИКА ЗАДАЧ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Рассмотрим специфику задач исследования солнечной атмосферы и связанные с ней инструментальные требования. Структура солнечной короны сложна и состоит из объектов разной интенсивности и размеров: от предельно слабых мелкомасштабных структур излучения спокойного Солнца в виде точечных радиоисточников, проявляющихся на уровнях  $10^{-3}$  с.е.п., до слабоконтрастных фоновых структур (типа гало) в активных областях с яркостной температурой, превышающей уровень спокойного Солнца лишь на 10–20%. Необходимо детальное исследование слабоконтрастных фоновых структур, так как они часто являются местами зарождения будущей активности и распада активных процессов. Особое значение имеет информация о магнитном поле на корональных высотах, где традиционные методы, использующие эффекты Зеемана и Ханле, ограничены из-за высоких температур в короне.

Спектральные наблюдения в см- и дм-диапазонах (1–30 см) позволяют развивать методы корональной магнитографии на основе хорошо отработанных механизмов: гирорезонансного, теплого тормозного излучения (Bremsstrahlung) и смен знака поляризации в квазипоперечных полях. Однако для этого требуются точные измерения поляризации с высоким пространственным разрешением. В последние годы успешно развиваются методы построения модели магнитосферы активной области в широком диапазоне высот, для чего необходима реализация большого динамического диапазона. При этом имеется в виду, что интенсивное излучение Солнца налагает ограничения

на наблюдения слабоконтрастных объектов из-за возникающего ухудшения чувствительности радиометрических систем, прямо пропорционального интенсивности исследуемого излучения.

Как отмечено выше, многие задачи изучения слабоконтрастных объектов на Солнце не могут быть решены с помощью современных радиогелиографов. Первая проблема обусловлена недостаточной чувствительностью по яркостной температуре, поскольку для интерферометрических систем она резко падает с уменьшением коэффициента заполнения синтезируемой апертуры. Другая проблема связана с отсутствием низких гармоник и наличием пустот в  $UV$ -плоскости, что затрудняет исследования крупномасштабных фоновых структур. Третья проблема вызвана трудностью обеспечения высокоточных поляризационных измерений ввиду того, что они требуют на один—два порядка большей фазовой стабильности гетеродинов, линий передачи и других систем. Проблемы калибровок, возникающие при сравнении измерений интенсивности на разных частотах, еще более сложны для поляризационных измерений в режиме интерферометра. Наконец, четвертая проблема состоит в сравнительно узкой непрерывной моментальной полосе частот, в которой можно получать изображение на интерферометрах даже с использованием методов частотного синтеза, применяемых в корреляторах нового поколения. Достижимые полосы наиболее широкополосных действующих крупных интерферометров (иногда применяемых при исследованиях Солнца) сегодня не превышают 8 ГГц, что составляет 16% на частоте 50 ГГц (EVLA).

Все изучаемые солнечные объекты и процессы можно условно разделить на:

- 1) сверхкомпактные и компактные со сложной структурой, в которых происходят нестационарные всплывающие процессы на масштабах минут—часов, для чего нужно временное разрешение от единиц минут до миллисекунд;
- 2) нестационарные переменные объекты на масштабах часов и суток, а также слабоконтрастные и протяженные объекты.

Первый класс процессов требует высокой чувствительности по потоку излучения, предельно высокого пространственного и временного разрешения, что могут обеспечивать крупные радиointерферометры. Второй класс процессов требует повышенного пространственного разрешения, умеренной чувствительности по потоку и высокой чувствительности по поверхностной яркости, большого динамического и широкого частотного диапазона, что обеспечивают крупные рефлекторы.

Солнечный спектральный комплекс РАТАН-600 перекрывает диапазон 1–18 ГГц с частотным

разрешением менее или равным 1% [9, 13]. В том же диапазоне 1–18 ГГц с частотным разрешением 2.5% работает радиогелиограф Owens Valley Solar Array (OVSA), но не одновременно, а последовательно, путем быстрой перестройки гетеродинов, что характерно для интерферометрической техники из-за ограниченной полосы корреляторов, трудностей фазирования и выравнивания задержек в широкой полосе. OVSA состоит из двух параболаидов диаметром 27 м и пяти антенн диаметром 1.8 м, расположенных в форме Т-образного креста. В расширенном варианте (EOVSA) добавлено еще восемь антенн диаметром 1.8 м в диапазоне 2.5–18 ГГц [14].

Крупнейший солнечный интерферометр нового типа FASR (США) [1] по проекту должен перекрыть диапазон 0.3–30 ГГц с высоким частотным разрешением 500 МГц и пространственным разрешением  $20/f_{\text{GHz}}$  [arcsec]. Этот инструмент основан на принципах Фурье-синтеза изображений и должен быть уникален по совокупности инструментальных параметров, однако его реализация сталкивается с серьезными трудностями. В России [15] и Китае [12, 16] на основе этих принципов создаются два новых крупных радиогелиографа, в которых сегодня решается сложная проблема формирования изображения в широкой полосе частот. Для этого синтез изображений высокого разрешения (апертурный синтез) выполняется параллельно на многих частотах. Перекрыть таким способом широкие полосы очень сложно и дорого, и потому применяют различные последовательно-параллельные схемы синтеза полосы.

Так, строящийся крупнейший китайский спектральный гелиограф (CSRH)-(MUSER) перекрывает два диапазона: 400–2000 МГц (CSRH-I)-(MUSER-I) ( $40 \times 4.5$ -м параболических антенн) с частотным разрешением 0.8–1.6% (64 канала) и 2–15 ГГц (CSRH-II)-(MUSER-II) ( $60 \times 2$ -м параболических антенн) с частотным разрешением 1.6–3.2% (128 каналов) [16] и пространственным разрешением до  $1''3$ . В нем применяется оригинальная техника сканирующего аналого-цифрового фильрбанка с полосой 600 МГц ( $200 \times 3$  МГц) аналогично используемому в Китае широкодиапазонному спектрополяриметру диапазона 2.6–3.8 ГГц [17]. Далее следует цифровой спектроанализатор с полосой канала 40 МГц (10 каналов). Сигнал каждого такого канала коррелируется с сигналами других антенн, и поэтому для 100 антенн требуется 49 500 ( $100 \times 99/2 \times 10$ ) сложных быстродействующих корреляторов. Несмотря на такое количество антенн, низкая чувствительность по яркостной температуре у CSRH сохранится даже при наличии большого числа корреляторов, поскольку она

принципиально непреодолима в крупных системах апертурного синтеза из-за дырчатого заполнения  $UV$ -плоскости пространственных частот [10]. Заметим, что апертурный суперсинтез Райла с заполнением  $UV$ -плоскости с помощью вращения Земли не подходит для исследований активного Солнца. С другой стороны, упомянутые выше проблемы фазовой стабильности в интерферометрических системах налагают серьезные ограничения на задачи, требующие высокоточных поляризационных измерений.

Все это приводит к специализации инструментов и не позволяет создать универсальный инструмент для всех классов задач.

В режиме слежения за объектом с помощью рефлекторного радиотелескопа структура изображения (чистая карта) регистрируется сразу на многих волнах, и потому на нем можно изучать динамику процессов на выбранных частях объекта или накапливать сигнал, повышая чувствительность по потоку, если на входе используется приемная матрица. Слежение за объектом в радиоинтерферометрическом режиме часто необходимо для формирования синтезированной апертуры и получения структуры (грязной карты) объекта, при этом также повышается чувствительность по потоку, но возникают сложности с изучением динамики процессов излучения.

Эффективность и востребованность инструмента для исследований Солнца также определяется необходимостью и возможностью детального изучения спектра и поляризации излучения объектов.

Для каждого крупного радиогелиографа и крупного рефлекторного радиотелескопа в настоящее время найдена своя ниша, и идет их интенсивное освоение. При использовании инструментов один дополняется другим как при решении физических задач, так и в вопросах калибровки потоков излучения по спектру. Сегодня каждый класс телескопов должен отвечать уровню современных требований, и задача исследователей состоит в том, чтобы активно участвовать в кооперации при наблюдениях на разных по своим возможностям инструментах.

### 3. О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ И РАДИОРЕФЛЕКТОРОВ

Для сопоставления параметров радиоинтерферометров (гелиографов) и радиорефлекторов (антенн со сплошной апертурой) мы провели оценку их чувствительности и динамических диапазонов, результаты которой сведены в таблицы 1 и 2.

Известно, что чувствительность антенной решетки по яркостной температуре определяется

максимальным диаметром синтезируемой апертуры, диаметром и количеством малых параболических зеркал, как:

$$\Delta T_b \sim \frac{D_{\max}^2}{d^2 N}, \quad (1)$$

где  $D_{\max}$  и  $d$  — диаметры синтезируемой и одиночных апертур,  $N$  — число антенн. Для крупных инструментов это соотношение ограничивает выбор объектов для исследований. Преодолеть такую проблему в случае антенных решеток частично удается только созданием сверхплотных конфигураций антенн, когда

$$D_{\max} \rightarrow d\sqrt{N}, \quad (2)$$

но для этого требуется огромное число антенн (около  $10^3$ , как в Square Kilometre Array (SKA) [18]), или приходится увеличивать плотность взаимного расположения антенн, до предела уменьшая  $D_{\max}$ , но при этом теряются преимущества крупной антенной решетки по пространственному разрешению.

Обычно для оценки качества получаемого изображения радиоинтерферометра используется фактор заполнения синтезируемой апертуры, который показывает степень заполнения решетки в сравнении со сплошным рефлектором при той же собирающей площади, равный:

$$\Gamma = \frac{\theta_s}{\theta_0} = \frac{d^2}{D_{\max}^2} \frac{4N}{\pi}, \quad (3)$$

где  $\theta_s$  — полуширина синтезированного луча по полю,  $\theta_0$  — полуширина луча одиночной антенны по полю,  $D_{\max}$  и  $d$  — диаметры синтезированной и одиночной апертур,  $N$  — число антенн в решетке. Фактор  $\Gamma$  для крупных радиоинтерферометров обычно не превышает  $\Gamma = 0.01-0.001$ , и этим определяется их приближение к сплошной апертуре.

Рассмотрим чувствительность рефлекторных радиотелескопов и интерферометров. Ожидаемую чувствительность рефлекторного радиотелескопа по антенной температуре  $\Delta T_a$ , яркостной температуре  $\Delta T_b$  и потоку  $\Delta S$  на Солнце можно оценить следующим образом:

$$\Delta T_a = 2 \frac{T_{\text{sys}} + \eta_a T_{\text{sun}}}{\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{sys}}$  — температура системы вне Солнца,  $T_{\text{sun}}$  — антенная температура от Солнца,  $\eta_a$  — антенная эффективность для протяженного источника (Солнца), включает потери от переоблучения раскрыва, матовое рассеяние, потери в облучателе (поглощение и отражение) и др. Оценки чувствительности по яркостной температуре можно получить из соотношения размеров диаграммы и объекта.

**Таблица 1.** Основные параметры крупных радиотелескопов для исследования солнечной плазмы в дм-, см- и мм-диапазонах длин волн

| Радиотелескоп                             | Диапазон $f, \Delta f$ , ГГц | Поляризация | Пространственное разрешение (макс), угл. сек. | Временное разрешение, мс | Разрешение по частоте, МГц | Размеры апертуры $L_{EW} \times L_{NS}$ , м | Число и диаметр малых антенн $N \times d$                    | Поле зрения, мин. дуги |
|---|------------------------------|-------------|---|--------------------------|----------------------------|---|--|------------------------|
| 1   | 2                            | 3           | 4   | 5                        | 6                          | 7   | 8  | 9                      |
| РАТАН-600 <sup>1)</sup><br>Россия [9, 13] | 0.75–18                      | I,R,L       | 12  | 100                      | 100                        | 275 × 7.4                                   |  | 60 × 15                |
| Nobeyama 45-m<br>Japan [7]                | 22–115                       | I           | 74–14   | 10                       | 100                        | 45  |  | 15 × 15                |
| NRH<br>France [2]                         | 0.15–0.45                    | I,V         | 144 × 192<br>42 × 56                          | 20                       | 30                         | 3200 × 2440                                 | 15 × 2m + 1 × 5m + 1 × 7m<br>+ 2 × 10m (WE),<br>25 × 5m (NS) | 23 × 10                |
| ССРТ<br>Россия [3]                        | 5.7                          | I,R,L       | 15  | 200                      | 0.25                       | 622 × 622                                   | 128 × 128 × 2.5m   | 42 × 42                |
| МССРТ<br>Россия [11, 22]                  | 4–8                          |             | 13  | 1.4 s                    | 400–600                    | 622 × 311<br>(311 × 155)                    | 128 × 64 × 1.8m<br>62 × 32 × 1.8m                            | 40 × 40                |
| NoRH<br>Japan [4]                         | 17, 34                       | I,R,L       | 5,10  | 0.050                    | 34                         | 490 × 220                                   | 84 × 0.8m  | 72 × 72<br>36 × 36     |
| FASR, USA [1]                             | 2–21                         | I,Q,U,V     | 1   | 20                       | 5                          | 2990 × 3800                                 | 45 × 2m  | > 30 × 30              |
| (CSRH) MUSER-I<br>China [12, 16]          | 0.4–2                        | I, R, L     | 51.6 × 10.3                                   | 25                       | 64<br>channels             | $D_{max} = 3000$                            | 40 × 4.5m  | 36 × 420               |
| (CSRH) MUSER-II<br>China [12, 16]         | 2-15                         | I,R,L       | 10.3 × 1.4                                    | 206                      | 528<br>channels            | $D_{max} = 3000$                            | 60 × 2m  | 36 × 36                |
| BIMA, USA [23]                            | 22–115                       | I,R,L       | 10  | 0.05                     | 50                         | $D_{max} = 90$                              | 10 × 6m  | 2 × 2                  |
| ALMA C40-1<br>USA [5, 24]                 | 30–950                       | I,Q,U,V     | 4   | < 0.1                    | < 1 <sup>2)</sup>          | $D_{max} = 150$                             | 50 × 12m + 12 × 6m <sup>3)</sup>                             | 1 × 1                  |
| ALMA C40-3<br>USA [5, 24]                 | 30–950                       | I,Q,U,V     | 1.5   | < 0.1                    | < 1 <sup>2)</sup>          | $D_{max} = 500$                             | 50 × 12m + 12 × 6m <sup>3)</sup>                             | 1 × 1                  |

<sup>1)</sup> Антенная система «Южный сектор с Перископом»;

<sup>2)</sup> В настоящее время реализовано  $\tau = 2$  с,  $\Delta f = 20$  МГц;

<sup>3)</sup> В настоящее время реализовано 40 × 12 м и 10 × 7 м.

Для  $\Omega_s \ll \Omega_a$ :

$$\Delta T_b = \frac{1}{\eta_a} \frac{\Omega_a}{\Omega_s} \Delta T_a = \frac{1}{\eta_a} \frac{\theta_a^2}{\theta_s^2} \Delta T_a \approx \frac{1}{\eta_a} \frac{4\text{HPBW}_a^2}{\theta_s^2} \Delta T_a; \quad (5)$$

для  $\Omega_s \gg \Omega_a$ :

$$\Delta T_b = \frac{1}{\eta_a} \Delta T_a, \quad (6)$$

где  $\Omega_a$ ,  $\Omega_s$  — телесные углы антенны и источника, HPBW — диаграмма антенны по уровню половинной мощности.

В случае несимметричной (ножевой) диаграммы направленности (ДН) чувствительность радиотелескопа по яркостной температуре может снижаться из-за сравнимости размера его ДН с размером исследуемой области по второй координате. Чувствительность по яркостной температуре радиотелескопа также снижается из-за атмосферного поглощения и вариаций радиояркостной температуры атмосферы, особенно в короткосантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. Для одной или двух последовательно измеряемых поляризаций чувствительность по потоку для одиночной антенны определяется как:

$$\Delta S = \frac{2k\Delta T_a}{A_{\text{eff}}}. \quad (7)$$

У интерферометров чувствительность по потоку обычно рассчитывают с учетом более сложной антенной структуры и эффективности корреляторов [19]:

$$\Delta S = \frac{4\sqrt{2}k(T_{\text{sys}} + T_s)}{\gamma\epsilon_q\epsilon_a\pi d^2\sqrt{n_p N(N-1)/2} \times \Delta f\tau}, \quad (8)$$

где  $\Delta S$  — чувствительность по потоку в  $\text{Вт м}^{-2} \text{Гц}^{-1}$ ,  $d$  — диаметр одиночной антенны в  $\text{м}^2$ ,  $n_p$  — число одновременно наблюдаемых поляризаций,  $N$  — число антенн в решетке,  $\epsilon_a$  — апертурная эффективность,  $\epsilon_q$  — эффективность квантования коррелятора (обычно не более 0.95),  $\gamma$  — параметр сетки (может быть близок к 1),  $k$  — константа Больцмана,  $T_{\text{sys}} + T_s$  — температура приемной системы с учетом антенной температуры источника на одиночной антенне,  $\tau$  — постоянная интегрирования,  $\Delta f$  — полоса синтеза.

Переход к чувствительности интерферометра по яркостной температуре следует из формул (7) и (8) в виде:

$$\Delta T_b = \frac{\Delta S\lambda^2}{2k\Omega_{\text{syn}}}, \quad (9)$$

где  $\Delta S$  — чувствительность по потоку излучения,  $\Omega_{\text{syn}}$  — синтезируемый телесный угол.

Для случая гауссового луча:

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{\pi\theta_{\text{syn}}^2}{4\ln 2} \sim \frac{\pi\lambda^2}{4\ln 2 D_{\text{max}}^2}. \quad (10)$$

Здесь предполагается, что телесный угол главного лепестка ДН антенны много меньше телесного угла источника:  $\Omega_{\text{syn}} \ll \Omega_s$ , где  $\theta_{\text{syn}}$  — полуширина синтезированного луча по мощности,  $D_{\text{max}}$  — максимальная физическая база (максимальный размер антенной решетки). Тогда

$$\Delta T_b = 2\ln 2 D_{\text{max}}^2 \Delta S = 0.32 D_{\text{max}}^2 [\text{км}] \times \Delta S [\text{мДж}]. \quad (11)$$

Для Солнца эту величину удобнее брать в солнечных единицах потока (с.е.п.), где  $1 \text{ с.е.п.} = 10^4 \text{ Дж}$ .

При высоком КПД антенны в случае разрешаемого источника  $\Delta T_b$  не зависит от его размера. Таким образом, чувствительность  $\Delta T_b$  квадратично ухудшается с ростом  $D$  и также квадратично улучшается с ростом  $d$ . В силу того, что  $D \gg d$ , чувствительность по яркостной температуре  $\Delta T_b$  для интерферометров обычно много хуже, чем у сплошных апертур.

Фактор заполнения синтезируемой апертуры  $\Gamma$  удается повысить до  $\Gamma = 0.1-0.3$  и более только в очень компактных конфигурациях крупных антенных решеток, что повышает их чувствительность по яркостной температуре  $\Delta T_b$  (например, режим D на Very Large Array (VLA) или режим Atacama Compact Array (ACA) на ALMA [5]).

При оценке чувствительности мы определяем потенциально достижимую чувствительность интерферометров при апертурной эффективности антенн  $\epsilon_a = 0.6-0.7$  и эффективности квантования корреляторов равной  $\epsilon_q = 0.95$ . Практически эти параметры могут отличаться от указанных, и известную реализованную (достигнутую) чувствительность интерферометров и рефлекторов мы указываем в Примечаниях к таблице 2.

Сделаем еще ряд замечаний относительно техники интерферометрической записи сигнала, чтобы объяснить возможные расхождения наших оценок с декларируемыми параметрами. Так, использование методов последовательно-параллельного анализа полосы вместо параллельного приводит к снижению чувствительности по антенной температуре, яркостной температуре и потоку излучения, поэтому реально достигнутая чувствительность может отличаться от расчетной. В нашем расчете мы используем физические полосы каналов, приводимые в спецификации радиотелескопа, хотя практически полосы в случае интерферометров могут быть уже или шире в результате частотного сканирования или выполнения процедуры корреляционного синтеза полосы.

Продемонстрируем это на примере ССРТ и NoRH, которые имеют рабочие полосы 120 МГц и 34 МГц соответственно. Как известно, ССРТ [3], в отличие от NoRH [4], не использовал традиционную технику параллельного апертурного синтеза и непосредственно получал изображение Солнца, а не его Фурье-компоненты. В радиогелиографе NoRH измеряются функции взаимной когерентности источника (видности)  $V(u, v)$  для пар антенн с разными базами, являющиеся Фурье-компонентами (гармониками) изображения источника. Каждая пара антенн дает точку на  $UV$ -плоскости, и для нее при движении или сканировании источника можно измерить отклик по полю, состоящий из интерферометрических лепестков, а по нему найти функцию видности:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (12)$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — интенсивность максимумов и минимумов интерферометрических лепестков, нули которых разнесены на  $\lambda/D$ , а расстояние между максимумами и минимумами равно  $\lambda/2D$ . Если источник разрешается данной парой антенн, то амплитуда  $V$  снижается, если не разрешается, то амплитуда  $V$  максимальна и зависит от потока источника. Инверсное двумерное БПФ-преобразование всех Фурье-компонент на  $UV$ -плоскости, согласно теореме Ван Цитерта—Цернике [20], позволяет получить «грязную» карту интенсивности протяженного источника:

$$I_D(x, y) = \iint V(u, v) S(u, v) e^{2\pi j(ux+vy)} dudv, \quad (13)$$

где  $S(u, v)$  — единичная функция отсчетов,  $S(u, v) = 1$  при наличии и 0 — при отсутствии измерения функции видности  $V(u, v)$ . Нулевые отсчеты функции видности означают дыры на  $UV$ -плоскости.

В технике Фурье-синтеза полоса интерферометра используется полностью, хотя для достижения полной фазировки системы и при определенном быстродействии коррелятора она обычно ограничена процентами основной частоты. В последние годы научились синтезировать (расширять) полосу до 10% основной частоты и более, разбивая весь диапазон на множество более узких полос и вводя в них параллельный корреляционный и Фурье-анализ сигнала. Так, у ALMA синтезируемая полоса 8 ГГц уже достигнута в восьми из десяти частотных диапазонов (с третьего по десятый), включая диапазон 100 ГГц. У ССРТ [3] луч диаграммы формировался интерферометрическим способом с помощью корреляции откликов двух линейных интерферометров креста E–W и N–S. В частности,

способом фазовой модуляции (переключением фазы  $0^\circ/180^\circ$ ) находились сумма и разность сигналов, а после детектирования вычитанием определялась их корреляционная компонента. Для сканирования Солнца по высоте использовалась зависимость углового положения интерференционного максимума от рабочей частоты в диапазоне 5.67–5.79 ГГц, что достаточно для перекрытия всего солнечного диска [3, 21]. В результате мгновенная полоса многократно сужается, и выходной сигнал регистрируется в узких каналах анализатора спектра (акустооптического и/или фильтрового), что как корень квадратный из соотношения полос уменьшает чувствительность инструмента.

Эффективная площадь интерферометра в общем случае не равна сумме эффективных площадей отдельных антенн. Для креста типа Миллса в режиме перемножения двух линейных интерферометров E–W и N–S эффективная площадь равна удвоенному среднему геометрическому эффективным площадям двух плеч E–W и N–S. Если их площади равны, то получаем удвоенную площадь линейного интерферометра. Если интерферометр T-образный и площадь одного плеча в два раза меньше, то получаем эффективную площадь интерферометра  $1.4S_0$  вместо  $1.5S_0$  при суммировании площадей. Если линейный  $N$ -элементный интерферометр используется парами в режиме Фурье-синтеза, то эффективная площадь двухэлементного интерферометра равна корню квадратному из произведения площадей, т.е. равна площади одной антенны (если их площади равны). Однако шум двух антенн не коррелирован, поэтому отношение  $S/N$  двухэлементного интерферометра в  $\sqrt{2}$  раз лучше, чем у одиночной антенны. Из  $N$  элементов можно образовать  $N(N-1)/2$  независимых интерферометров, и их эффективная площадь в случае идентичных антенн для одной поляризации будет равна

$$S_{\text{eff}} = S_0 \sqrt{\frac{N(N-1)}{2}}. \quad (14)$$

В случае двумерного интерферометра число возникающих пар антенн и их сочетаний определяется более сложным образом, и особенно непросто, если интерферометр имеет спиральную логарифмическую структуру, как в китайском CHSR. Однако эффективная площадь интерферометра всегда меньше суммы эффективных площадей входящих в него антенн и может к ней только приближаться. Для простоты мы будем считать  $S_{\text{eff}} \approx S_i = NS_0$ .

Мы также будем получать чувствительность по яркостной температуре рефлекторов и интерферометров для протяженных источников неодинакового размера. Протяженными источниками для рефлекторов являются источники, размер которых

больше ширины ДН с ближайшими боковыми лепестками, и потому речь идет о размерах масштаба нескольких  $\lambda/D$ . Протяженными источниками для интерферометров являются источники, угловой размер которых  $\theta_{\text{syn}} \gg \lambda/D_{\text{syn}}$  и соизмерим с  $\lambda/d_0$ .

При малых (субсекундных) временах интегрирования контрасты протяженных структур и спокойного Солнца у радиогелиографа минимальны и часто неразличимы при больших базах. В см-диапазоне значительные контрасты наблюдаются у радиоисточников в области пятен, где возникает циклотронное излучение высокотемпературной корональной плазмы в сильных магнитных полях. В мм-диапазоне нет циклотронного излучения над пятнами из-за отсутствия сильных магнитных полей и высоких температурных градиентов, а превалирует тормозное тепловое излучение холодной и плотной плазмы в хромосфере. При этом для изучения слабоконтрастных протяженных солнечных структур в хромосфере необходима высокая чувствительность по яркостной температуре.

Параметры крупных существующих и строящихся (проектируемых) солнечных инструментов см-диапазона сведены в таблицу 1. Крупные солнечные существующие или проектируемые инструменты мм-диапазона, как рефлекторные, так и решетки, нам неизвестны. ALMA не может рассматриваться в таком качестве, поскольку не предназначен для регулярных наблюдений Солнца. Тем не менее, в силу возможностей этого мощного инструмента для решения различных задач, в том числе исследования солнечной атмосферы, мы включили его в таблицу в наиболее компактных конфигурациях, используемых для наблюдений Солнца.

Результаты наших расчетов чувствительности инструментов приведены в таблице 2. Практически достигнутые значения чувствительности по данным литературы приведены в Примечаниях к таблице. Следует отметить, что такой важный параметр как антенная эффективность с учетом потерь в облучателях и СВЧ-линиях передачи до МШУ обычно не указывается в литературе и спецификациях инструментов, и потому приведенные параметры носят оценочный характер. В то же время без него невозможно адекватно оценить параметры инструментов в разных режимах работы.

Характеристики инструментов в таблице 2 перечислены в следующих столбцах: (1) название радиотелескопа, (2) длина волны, принятая для расчетов, (3) частотное разрешение, (4) постоянная времени, (5) полуширина ДН, (6) размер источника, принятого для расчета, (7) чувствительность по антенной температуре, (8) эффективная площадь, (9) чувствительность по яркостной температуре, (10) чувствительность по потоку принимаемого излучения.

Низкие чувствительности по яркостной температуре к протяженным источникам на максимальных базах интерферометров могут быть частично компенсированы накоплением сигнала, поскольку протяженные компоненты и области менее динамичны, а накопление сигнала можно выполнять в цифровом виде, анализируя его на наличие быстропеременных процессов. Тем не менее моментальная чувствительность по яркостной температуре радиогелиографов остается низкой, и чувствительность, которая приводится в спецификациях инструментов на уровне 1000 К, как правило, предполагает «снимок» Солнца с накоплением (выдержкой) не менее 1 с. В некоторых работах, например, [11, 21], приводится на порядок более высокая ожидаемая чувствительность радиогелиографа ССРТ на уровне 100 К, близкая к чувствительности радиорефлекторов, без указания фактического времени накопления, необходимого для ее достижения.

Мы также включили в таблицы 1 и 2 интерферометр ВІМА, на котором ранее периодически выполнялись наблюдения Солнца, чтобы иметь для сравнения компактный интерферометр мм-диапазона. Мы взяли ту же частоту и ту же конфигурацию ВІМА, при которых проводились наблюдения Солнца [23]. В инструменте ВІМА имелись базы значительно больших размеров, но они не использовались. По-видимому, это было необходимо для достижения приемлемой скорости получения изображения Солнца и достаточной чувствительности по яркостной температуре в 3.5-мм-диапазоне длин волн. Полноповоротный радиотелескоп в Nobeyama [7] с диаметром зеркала 45 м представляет в таблицах 1 и 2 достаточно крупный рефлекторный инструмент мм-диапазона, с его помощью периодически наблюдали и картографировали Солнце с высоким пространственным разрешением до начала регулярной работы радиогелиографа NoRH в 1992 г.

FASR и MUSER из-за своих размеров имеют особо низкие чувствительности по яркостной температуре (см. таблицы 1 и 2), их главное назначение состоит в изучении вспышечных процессов и механизмов генерации мощных событий на Солнце в см-диапазоне длин волн.

Интерферометр ALMA в самой компактной конфигурации даже превосходит рефлекторные инструменты в чувствительности по яркостной температуре за счет очень высокой антенной эффективности, размеров и эффективной площади отдельных антенн, а также за счет одновременного приема двух поляризаций (см. таблицу 2). Чувствительность ALMA по потоку составляет  $10^{-4}$  с.е.п., что является рекордом.



**Таблица 2.** Характеристики крупных радиотелескопов для исследования солнечной плазмы в дм-, см- и мм-диапазонах длин волн

| Инструмент          | $\lambda$ ,<br>мм | $\Delta f$ ,<br>МГц     | $\tau$ ,<br>с | HPBW,<br>угл. сек.                  | $\theta_s$ ,<br>угл. мин. | $\Delta T_a$ ,<br>К | $S_{\text{eff}}$ ,<br>м <sup>2</sup> | $\Delta T_b$ ,<br>К   | $\Delta S$ ,<br>10 <sup>-3</sup> с.е.п. |
|---------------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|
| (1)                 | (2)               | (3)                     | (4)           | (5)                                 | (6)                       | (7)                 | (8)                                  | (9)                   | (10)                                    |
| ПАТАН-600           | 16.6<br>[9, 13]   | 100                     | 0.1           | 15 × 900                            | > 1                       | 5                   | 500                                  | 25 <sup>1)</sup>      | 2.5 <sup>2)</sup>                       |
| Nobeyama 45-m       | 3.5<br>[7]        | 100                     | 0.1           | 19 × 19                             | > 1                       | 5 <sup>3)</sup>     | 600                                  | 20 <sup>4)</sup>      | 2.0                                     |
| NRH                 | 670<br>[2]        | 1                       | 0.05          | 42 × 56                             | > 3                       | 100                 | 400<br>(NS)                          | > 50 000              | > 50                                    |
| ССРТ                | 52<br>[3]         | 120, 0.25 <sup>5)</sup> | 0.014         | 20 × 20                             | > 15                      | 7                   | 700                                  | 1250 <sup>6)</sup>    | 2 <sup>7)</sup>                         |
| МССРТ               | 37.5<br>[11, 22]  | 10                      | 0.1           | 20 × 20<br>40 × 40<br>(64 × 32 ант) | > 15                      | 4                   | 150                                  | 2000 <sup>8)</sup>    | 5 <sup>9)</sup>                         |
| NoRH                | 8.8, 17.6<br>[4]  | 17, 8                   | 0.05          | 10 × 10                             | > 15                      | 6                   | < 30                                 | 3000 <sup>10)</sup>   | 34, 14 <sup>11)</sup>                   |
| FASR <sup>12)</sup> | 14<br>[1]         | 15                      | 0.1           | 1 × 1                               | > 15                      | 2                   | 85                                   | 1000 K <sup>13)</sup> | 0.8                                     |
| MUSER-I, II         | 20<br>[12, 16]    | 26                      | 0.2           | 1.3 × 1.3                           | > 15                      | 6                   | 115                                  | 79 000 <sup>14)</sup> | 2.7                                     |
| BIMA                | 3.5<br>[23]       | 100                     | 0.05          | 10 × 10                             | > 2                       | 7                   | 170                                  | 280                   | 10                                      |
| ALMA C40-1          | 3<br>[5, 24]      | 20                      | 0.1           | 4 × 4                               | > 1                       | 4 <sup>15)</sup>    | 4000                                 | 18                    | 0.25                                    |
| ALMA C40-3          | 3<br>[5, 24]      | 20                      | 0.1           | 1.5 × 1.5                           | > 1                       | 4 <sup>15)</sup>    | 4000                                 | 200                   | 0.25                                    |

1) 100 К для  $\tau = 0.1$  с, хуже из-за потерь в применяемом широкополосном облучателе, снижающем антенную эффективность;

2) 10 для  $\tau = 0.1$  с, хуже из-за потерь в применяемом широкополосном облучателе, снижающем антенную эффективность;

3) с солнечным фильтром (SF);

4) 50 К при  $\tau = 0.1$  с, с солнечным фильтром (SF);

5) 120 и/или 0.25;

6) 1500 К при  $\tau = 0.014$  с;

7) 50 при  $\tau = 1$  с,  $\Delta f = 1$  с;

8) 700 К для 48 антенн при  $\tau = 1$  с;

9) 10 для 48 антенн при  $\tau = 1$  с;

10) 1300 К при  $\tau = 1$  с;

11) 4.4 при  $\tau = 1$  с;

12) проект США, с частичной реализацией в рамках EOVSR [14];

13) 55 000 К с максимальной базой;

14) с максимальной базой;

15) на Солнце в режиме смещения рабочей точки SIS-смесителей (без SF).

#### 4. О ВОЗМОЖНОСТЯХ КРУПНЫХ РЕФЛЕКТОРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Рассмотрим возможности крупного рефлекторного радиотелескопа РАТАН-600 и уникального инструмента ALMA.

##### 4.1. РАТАН-600

На этом инструменте сейчас реализуются методы наблюдений временной динамики активных структур для слабоконтрастных и вспышечных образований при использовании азимутальных режимов.

Возможность длительного сопровождения космических источников принципиально заложена в конструкции АС «Юг+Плоский» радиотелескопа РАТАН-600 [25]. Здесь были рассмотрены два возможных режима сопровождения — «бегущая парабола» с размером апертуры 275 м и неподвижный круговой цилиндр с радиусом  $R_0 = 288$  м. При этом вторичные зеркала (облучатели) в этих режимах работы перемещаются по дуговому рельсовому пути радиусом 156 м и  $R_0/2 = 144$  м соответственно в диапазоне азимутальных углов  $\pm 30^\circ$ , что позволяет непрерывно сопровождать источники не менее 4 часов. Возникающую во втором случае сферическую абберацию было предложено исправлять специальным вторичным зеркалом двойной кривизны, что позволяет выполнить точную фокусировку главного зеркала (ГЗ) с эффективным размером апертуры 200 м.

Предложенное в работе [26] сокращение действующей апертуры ГЗ в форме кругового цилиндра оптимального радиуса с 270 м до 100–170 м дает возможность образовать длиннофокусную АС и увеличить поле зрения инструмента на порядок и более до  $\pm 2^\circ - 3^\circ$  в диапазоне длин волн 2–30 см. Это позволяет сопровождать или сканировать АО Солнца с неподвижным ГЗ в течение 12–20 минут в любом азимуте и в совокупности более 3 часов в день в диапазоне азимутов  $\pm 30^\circ$  с 15–10 перестановками ГЗ.

Для повышения эффективности инструмента в режиме длительного сопровождения (до 4 часов) были разработаны способы контроля характеристик АС «Юг+Плоский» в азимутах по сигналу искусственных спутников Земли [27], в том числе с применением методов радиоголографии [28].

С целью реализации наблюдений активного Солнца в широком диапазоне сигналов (от мелко-масштабных структур 0.01 с.е.п. на уровне спокойного Солнца  $T_{(qS)}^a$  до сигналов от мощных вспышек,

превышающих уровень  $100 T_{(qS)}^a$ ) была создана улучшенная версия солнечного спектрально-поляризационного комплекса РАТАН-600 с высоким динамическим диапазоном, в котором реализованы следующие основные параметры:

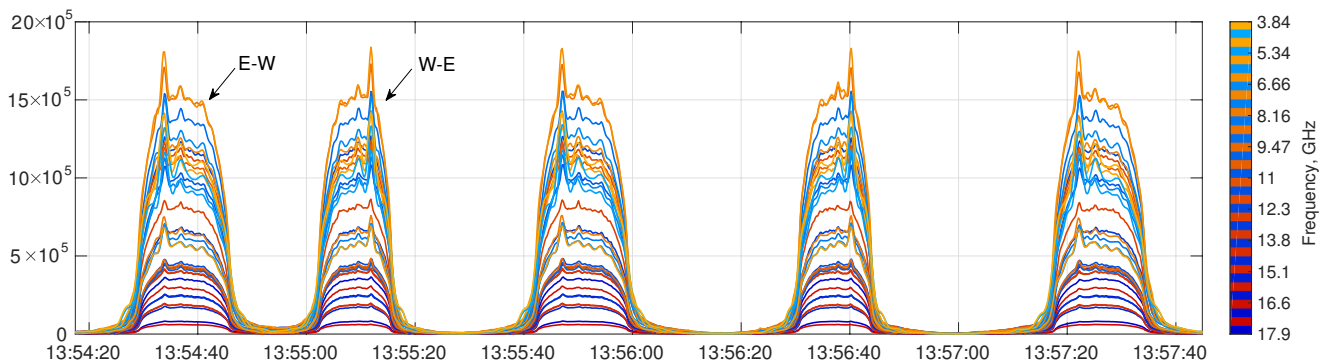
- ширина перекрываемого диапазона частот 3–18 ГГц;
- 180 каналов круговой поляризации LR;
- 1-й уровень частотного разрешения 10 каналов с полосой 1500 МГц и чувствительностью 0.03–0.05 К при  $\tau = 1$  с;
- 2-й уровень частотного разрешения, в котором 10 поддиапазонов разбиваются на 8 каналов с полосой 100 МГц с чувствительностью 0.3–0.5 К при  $\tau = 1$  с;
- шумовая температура приемника (без учета потерь в облучателе) около 200–300 К, что позволяет выполнять наблюдения калибровочных источников;
- общий динамический диапазон 60–65 дБ для регистрации мощных вспышечных событий.

Модульная система сбора данных нового поколения позволяет регистрировать события на Солнце с временным разрешением до 1 мс. Реализовано программное управление динамическим диапазоном, что дает возможность наблюдать как слабоконтрастные сигналы на уровне хромосферой сетки, так и мощные вспышки, превышающие  $10^6$  К по антенной температуре.

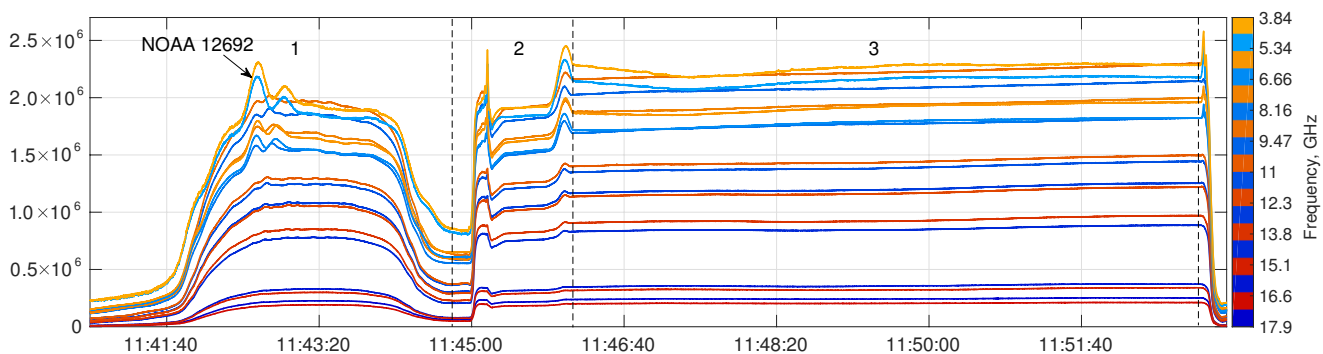
Примеры тестирования режима сопровождения и быстрого сканирования Солнца облучателем на АС «Юг+Плоский» с сокращенной апертурой (100 м) на усовершенствованном солнечном комплексе приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 представлено наблюдение диска Солнца в интенсивности и круговой поляризации одновременно на нескольких частотах солнечного спектрального комплекса. Наблюдения проводились в одном из азимутов ( $-24^\circ$  от меридиана) изменением азимутального угла с помощью каретки облучателей. Принципиально показана возможность проведения наблюдений в большом количестве азимутов (до 60) с несколькими быстрыми сканированиями в каждом. Этот режим является перспективным для изучения вспышечно-продуктивных активных областей.

На рис. 2 представлено наблюдение диска Солнца в азимуте  $+4^\circ$  от меридиана в режиме сопровождения. Предварительно проводится сканирование Солнца в режиме прохождения Солнца на всех частотах комплекса. Далее диаграмма



**Рис. 1.** Пример быстрого сканирования Солнца облучателем на АС «Юг+Плоский» РАТАН-600 на разных частотах диапазона 3–18 ГГц в двух круговых поляризациях 26 марта 2017 г. в азимуте  $-24^\circ$ . Размерность оси ординат дана в отсчетах АЦП. Ось абсцисс — абсолютная шкала времени, UTC+3. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.



**Рис. 2.** Пример регистрации активной области NOAA 12692 в режимах: 1 — прохождение Солнца, 2 — наведение на радиосточник диаграммой радиотелескопа для сопровождения и 3 — сопровождение в антенной системе «Юг+Плоский» РАТАН-600 26 декабря 2017 г. в азимуте  $+4^\circ$  на разных частотах диапазона 3–18 ГГц в двух круговых поляризациях. Размерность оси ординат дана в отсчетах АЦП. Ось абсцисс — абсолютная шкала времени, UTC+3. Рисунок в цвете приведен в электронной версии статьи.

наводится на исследуемый радиосточник и осуществляется его сопровождение в течение 7 минут. В данном временном интервале регистрация не показывает значительных временных изменений сигналов. Регистрация ведется в широком диапазоне шкалы АЦП, и при этом сохраняется возможность измерять мелкомасштабную структуру. Режим предполагается использовать для изучения частотно-временной структуры квазипериодических пульсаций в активных областях Солнца.

Новые режимы работы радиотелескопа РАТАН-600 позволят исследовать динамику активных событий на Солнце в широком диапазоне высот, изучать колебания и пульсации в АО Солнца.

#### 4.2. Новый инструмент ALMA

В последние годы большие надежды возлагаются на крупнейший мм- и суб-мм-интерферометр ALMA, построенный на высоте более 5000 м в

горной пустыне Атакама в Чили. Еще на этапе проектирования и сооружения ALMA солнечных астрофизиков привлекла возможность его использования как крупнейшего инструмента для исследования солнечной хромосферы [5]. ALMA обладает эффективной площадью, соизмеримой с площадью 100-м полноповоротного зеркала, и имеет очень высокую чувствительность по потоку в мм- и суб-мм-диапазонах длин волн. Способность формирования различных компактных, в том числе сверхплотных, конфигураций у ALMA, применение антенн разного диаметра, использование практически перекрывающихся в пространстве на луче зрения апертур (за счет наклона близко расположенных зеркал) дают возможность приблизить фактор заполнения синтезируемой апертуры  $\Gamma$  к 1 и добиться высокой чувствительности и по яркостной температуре. Это позволит проводить фундаментальные исследования структуры хромосферы, процессов нагрева хромосферы и короны, изучать слабоконтрастные точечные и протяженные

области, включая феномены спокойного Солнца. Для изучения хромосферы Солнца ALMA открывает новый малоисследованный диапазон мм- и суб-мм-волн. Однако для получения полной картины распространения активности в более высокие слои солнечной атмосферы наблюдения в см-, дм- и М-диапазонах должны по возможности сопровождать работу ALMA.

В полностью завершеном виде ALMA состоит из 66 высокоточных антенн, которые включают 50 свободно перемещаемых зеркал ( $d = 12$  м), 12-м антенную решетку из антенн  $d = 12$  м, 7-м антенную решетку из 12 максимально плотно расположенных зеркал ( $d = 7$  м). Четыре одиночных зеркала ( $d = 12$  м) для одновременных наблюдений протяженных структур со смещением луча в широком поле зрения в режиме Total Power Array (TPA) образуют режим Atacama Compact Array (ACA). ALMA имеет различные возможные конфигурации: от сверхкомпактной (с базой 15 м) до расширенной (с максимальной базой 16 км). В уникальном по своим возможностям инструменте ALMA будет перекрыт широчайший частотный диапазон от 35 ГГц до 950 ГГц (от 8.6 мм до 0.3 мм), который разбит на 10 поддиапазонов. Эти поддиапазоны переключаются с помощью сложной приемной оптики наклоном контррефлекторов, а изображения синтезируются в полосе 8 ГГц в двух ортогональных поляризациях.

Для исследований Солнца предлагается три компактных интерферометрических режима ALMA с максимальными базами 150 м (C40-1), 250 м (C40-2) и 500 м (C40-3) в двух диапазонах 100 ГГц и 230 ГГц. Для наблюдения быстродинамических и вспышечных процессов, включая Солнце, на ALMA предусмотрен режим наблюдения четырьмя отдельными зеркалами, лучи которых с заданным смещением могут покрыть активную область.

Напомним, что поле зрения ALMA составляет менее  $1'$  на 90 ГГц и в 10 раз меньше на 900 ГГц, что определяется шириной ДН одиночного телескопа (HPBW). Для расширения поля зрения предусмотрен режим построения мозаичного изображения. С этой целью оси всех антенн последовательно наводятся на узлы прямоугольной или более плотной гексагональной сетки с шагом порядка HPBW/2 по Найквисту, и в результате строится мозаичная карта. Для построения гексагональной мозаики размером  $4' \times 4'$  на частоте 100 ГГц необходимо 85 наведений.

В 2017 г. по результатам первых наблюдений Солнца на инструменте ALMA появились публикации [29, 30], которые указывают на перспективность изучения на ALMA процессов радиоизлучения в хромосфере Солнца. Проведенный анализ наблюдений активной области

NOAA 12470 [30] указывает на важность сопоставления мм-наблюдений с данными рефлекторного радиотелескопа RATAN-600 в широком диапазоне см- и дм-волн для выбора адекватной модели хромосферы в области крупного пятна. Такое сопоставление приведет к лучшему пониманию процессов в различных солнечных структурах, позволит наблюдать их формирование и развитие на высотах хромосферы и нижней короны — области, важной для изучения нагрева короны. Для этих целей предполагается развивать методы наблюдений на RATAN-600 в следующих направлениях:

- 1) измерение высотной структуры плазмы и магнитного поля в широком диапазоне высот (хромосфера—корона) для отдельных относительно стабильных объектов на Солнце (активные области, волокна, флоккулы, протуберанцы, корональные дыры, шумовые бури и др.) по данным суб-мм- и см-диапазонов длин волн;
- 2) повышение эффективности работы радиотелескопа и расширения рабочего диапазона RATAN-600 в сторону метровых (до 60 см) и миллиметровых (до 3–4 мм) волн для детального сопоставления с данными ALMA;
- 3) внедрение на радиотелескопе новых режимов наблюдения — быстрых сканирований и длительного сопровождения Солнца.

К моменту публикации статьи на RATAN-600 получены новые результаты по повышению точности и быстродействия движения антенной системы, проводится модернизация кинематических узлов, механизмов и приводов отражательных элементов, испытываются различные методы повышения точности перемещения облучателей RATAN-600 [31].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе сделана попытка с единых позиций взглянуть на возможности и характеристики основных существующих и проектируемых крупных инструментов для исследования солнечной плазмы. Показано, что интерферометры и рефлекторы по своим характеристикам хорошо дополняют друг друга. Специфика солнечных задач и инструментов диктует необходимость широкой кооперации для получения всей доступной информации. Основная тенденция сегодня состоит в том, чтобы отвечать уровню современных требований по каждому классу инструментов для эффективного участия в такой кооперации. В связи с пуском нового крупнейшего инструмента мм- и суб-мм-диапазона ALMA появляется возможность получения новых данных о процессах радиоизлучения в хромосфере Солнца. Развитие инструментальных

возможностей радиотелескопа РАТАН-600 позволит ему оставаться востребованным во многих областях солнечной радиоастрономии в эпоху ALMA. С другой стороны, для исследователей на ALMA могут быть весьма полезными данные регулярных наблюдений нижней короны с помощью крупных радиотелескопов микроволнового и метрового диапазонов, и наоборот, наблюдательные программы существующих крупных инструментов могли бы быть оптимизированы с учетом планов наблюдений Солнца на ALMA.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны академику Ю. Н. Парийскому за проявленный интерес к этой статье.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания: №АААА-А17-117011810013-4, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект №18-02-00045.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. S. Bastian, *Astrophys. Space Sci. Library* **314**, 47 (2004).
2. M. Pick, *Highlights Astronomy* **7**, 765 (1986).
3. V. V. Grechnev, S. V. Lesovoi, G. Y. Smolkov, et al., *Solar Physics* **216**, 239 (2003).
4. H. Nakajima, M. Nishio, S. Enome, et al., *J. Astrophys. Astron. Suppl.* **16**, 437 (1995).
5. S. Wedemeyer, T. Bastian, R. Brajša, et al., *Space Sci. Rev.* **200**, 1 (2016).
6. E. Fuerst, N. Keen, and W. Hirth, *Kleinheubacher Berichte* **18**, 133 (1975).
7. T. Kosugi, M. Ishiguro, and K. Shibasaki, *Publ. Astron. Soc. Japan* **38**, 1 (1986).
8. L. D. Bakhrakh, M. I. Grigorieva, V. A. Efanov, et al., *Radiophys. Quantum Electronics* **16**, 511 (1973).
9. V. M. Bogod, *Astrophysical Bulletin* **66**, 190 (2011).
10. N. A. Esepkina, D. V. Korol'kov, and Y. N. Parijskij, *Radioteleskopy i radiometry* (Nauka, Moskva, 1973) [in Russian].
11. S. V. Lesovoi, A. T. Altyntsev, E. F. Ivanov, and A. V. Gubin, *Solar Physics* **280**, 651 (2012).
12. Y. Yan, J. Zhang, W. Wang, et al., *Earth, Moon Planets* **104**, 97 (2009).
13. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 205 (2011).
14. D. E. Gary, G. J. Hurford, G. M. Nita, et al., *BAAS* **224**, 123.60 (2014).
15. S. V. Lesovoi, A. T. Altyntsev, E. F. Ivanov, and A. V. Gubin, *Research Astron. Astrophys.* **14**, 864 (2014).
16. J. Du, Y. Yan, W. Wang, and D. Liu, *Publ. Astron. Soc. Australia* **32**, e026 (2015).
17. H.-r. Ji, Q.-j. Fu, Y.-y. Liu, et al., *Chinese Astron. Astrophys.* **24**, 387 (2000).
18. R. Schilizzi, in *Proc. Meet. From Antikythera to the Square Kilometre Array: Lessons from the Ancients, Kerastari, Greece, 2012*, id 44.
19. R. L. Brown, *SPIE* **3357**, 231 (1998).
20. T. L. Wilson, K. Rohlf, and S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy* (Springer-Verlag, Berlin, 2009).
21. A. A. Kochanov, S. A. Anfinogentov, D. V. Prosovetsky, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **65**, S19 (2013).
22. S. Lesovoi, A. Altyntsev, A. Kochanov, et al., *Solar-Terrestrial Physics* **3**, 3 (2017).
23. M. R. Kundu, S. M. White, N. Gopalswamy, and J. H. Biegging, in *Proc. Workshop Developments in Observations and Theory for Solar Cycle 22, Laurel, USA, 1989*, Ed. by R. M. Winglee and B. R. Dennis (1989), pp. 119–130.
24. S. M. White, K. Iwai, N. M. Phillips, et al., *Solar Physics* **292**, 88 (2017).
25. N. L. Kajdanovskij, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **7**, 214 (1975).
26. В. Б. Хайкин, М. К. Лебедев, Н. Н. Бурсов и др., *Труды ИПА РАН* **47**, 53 (2018).
27. V. B. Khaikin, M. K. Lebedev, and N. N. Bursov, *Zhurnal radioelektroniki*, **7**, 1 (2015).
28. V. B. Khaikin, M. K. Lebedev, A. M. Ripak, and A. A. Storozhenko, *Zhurnal radioelektroniki*, **11**, 1684 (2017).
29. C. E. Alissandrakis, S. Patsourakos, A. Nindos, and T. S. Bastian, *Astron. and Astrophys.* **605**, A78 (2017).
30. M. A. Loukitcheva, K. Iwai, S. K. Solanki, et al., *Astrophys. J.* **850**, 35 (2017).
31. В. Б. Хайкин, А. А. Стороженко, С. В. Шлензин, и др., *Труды ИПА РАН* **47**, 64 (2018).

## Radioheliographs and Radio Reflectors for Solar Plasma Studies

V. B. Khajkin, A. A. Storozhenko, and V. M. Bogod

The paper covers characteristics of big interferometers and reflecting radio telescopes in the studies of the solar atmosphere radiation. Solar radio interferometers (radioheliographs) turned more profitable than single reflecting radio telescopes, since using the aperture synthesis allowed one to draw Solar images and its active regions faster and with better spacial resolution and also to efficiently study solar flares. Unfortunately, the studies of many fundamental issues of the solar atmosphere physics requiring studies of faint structures before and after flares gained no proper development. The efficiency of radio reflectors was enhanced in last decades mainly due to the development of matrix methods of receiving, focal grids, and also due to spectroscopic analysis in the wide wavelength range with high radiation-flux sensitivity. Meanwhile, the diversity of issues related to the physics of the solar atmosphere and active processes requires an optimal application of capabilities of various interferometric and reflecting systems of the microwave range for joint studies of the Sun. In view of the started implementation of solar observation programs with a new instrument, ALMA, and obtaining newly observed data in the millimeter and submillimeter ranges, the areas of development of solar studies with the RATAN-600 radio telescope in the wide wavelength range are discussed.

Keywords: *Sun: radiation—instruments: interferometers—telescopes*