УДК 520.274.3 DOI: 10.12737/szf-74202111 Поступила в редакцию 02.07.2021 Принята к публикации 28.09.2021

# КАЛИБРОВКА АМПЛИТУД КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАЧИ АНТЕНН СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗБЫТОЧНОСТИ

## CALIBRATION OF SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH ANTENNA GAINS USING REDUNDANCY

#### М.В. Глоба

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, globa@iszf.irk.ru

#### С.В. Лесовой

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, svlesovoi@gmail.com

Аннотация. В статье описывается применение стандартной методики калибровки модулей коэффициентов передачи антенн с использованием избыточности для 48-антенного прототипа Сибирского радиогелиографа. Традиционно для калибровки измерялись видности только между соседними антеннами, так как они обладают наибольшим соотношением сигнал/шум и их достаточно для фазовой калибровки. Показано, что этот ограниченный набор видностей не позволял использовать потенциал избыточности антенной решетки и получать изображения с большим динамическим диапазоном на постоянной основе. Изображения без амплитудной калибровки содержат множество артефактов и требуют большой осторожности при анализе. Включение измерения видностей парами антенн с двойным шагом позволило существенно повысить точность решения системы уравнений для амплитуд. Изображения, получаемые с использованием как фазовой, так и амплитудной калибровок практически не содержат видимых артефактов и являются более достоверными.

Ключевые слова: солнечный радиотелескоп, функция видности, радиоинтерферометр, калибровка коэффициентов передачи.

### введение

Современные задачи солнечной радиоастрономии. например. такие как исследование слабой активности, ставят все более высокие требования к качеству изображений. Для повышения динамического диапазона и достоверности изображений, получаемых радиоинтерферометрами, требуется улучшать методики калибровки и чистки данных (CLEAN). Калибровка комплексных коэффициентов передачи антенн, которые вносят искажения в измеряемые интерферометром видности, является первоочередной задачей при построении радиоизображений. Выбор конкретного способа зависит от инструмента и наблюдаемого объекта. Для звездных радиоинтерферометров, обладающих высокой чувствительностью и малым углом обзора, самым приемлемым способом калибровки является наблюдение хорошо

#### M.V. Globa

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, globa@iszf.irk.ru

## S.V. Lesovoi

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, svlesovoi@gmail.com

Abstract. The paper describes application of standard gain calibration using redundancy for a 48-antenna prototype of Siberian Radioheliograph. Traditionally, for calibration, the visibilities were measured only between adjacent antennas since they have the highest signal-to-noise ratio and are sufficient for phase calibration. We have shown that this limited set of visibilities did not allow using the antenna array redundancy potential and obtaining images with a high dynamic range on a permanent basis. Images without amplitude calibration contain many artifacts and require special care when analyzed. The inclusion of visibility measurement between antennas with a double step made it possible to significantly increase the accuracy of solving the system of equations for amplitudes. Images constructed using both phase and amplitude calibrations do not have visible artifacts and are more reliable.

**Keywords:** solar radio telescope, visibility function, radio interferometer, gain calibration.

известных стабильных точечных источников. Полученный таким образом грубый результат калибровки затем, как правило, уточняется при помощи самокалибровки [Cornwell, Fomalont, 1989].

При проектировании Сибирского радиогелиографа (СРГ) [Алтынцев и др., 2020] и его 48-антенного прототипа (СРГ-48) [Lesovoi et al., 2012; Лесовой и др., 2017] учитывалось, что наблюдение точечных источников невозможно из-за недостаточной чувствительности, а самокалибровка затруднительна при наблюдениях спокойного Солнца, так как требует подбора модели распределения яркости по диску Солнца. По этим причинам, а также с учетом уже имеющейся инфраструктуры Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) [Grechnev, 2003], были выбраны Т-образные конфигурации решеток с избыточностью. Избыточность означает наличие нескольких пар антенн, измеряющих одну и ту же компоненту пространственного спектра распределения яркости. Калибровка с использованием избыточности не требует дополнительных наблюдений хорошо известных стабильных источников, а также не требует подбора модели распределения яркости по диску Солнца. Первые работы по калибровке с использованием избыточности были сделаны для Вестерборкского синтезирующего радиотелескопа (Westerbork Synthesis Radio Telescope, WSRT) [Noordam, de Bruyn, 1982; Wieringa, 1992], а затем эта методика успешно применялась на радиогелиографе Nobeyama [Nakajima et al., 1994].

СРГ-48 функционировал с 2016 по 2021 г. Данные, полученные до 2020 г., в основном использовались только с фазовой коррекцией. Фазовые искажения наиболее сильно влияют на изображение. Это объясняется тем, что при одинаковой точности измерения фазы и амплитуды (например, 10 %), искажения, вызванные фазовыми ошибками, гораздо сильнее снижают динамический диапазон изображения. С другой стороны, амплитудные ошибки обычно меньше фазовых, поэтому для построения приемлемого изображения бывает достаточно только фазовой коррекции. Для получения изображений с большим динамическим диапазоном необходимо выполнять также и амплитудную коррекцию.

В статье описана методика калибровки с использованием избыточности в общем виде и ее применение для СРГ-48. Показано, что амплитудная коррекция невозможна без измерения видностей с удвоенным шагом. Результат проиллюстрирован на модельных и реальных данных СРГ-48.

### МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗБЫТОЧНОСТИ

В общем случае видности, измеряемые каждой парой антенн интерферометра, можно записать в следующем виде:

$$\tilde{V}_{kl}(t) = g_k(t)g_l^*(t)G_{kl}(t)V_{kl}(t) + \varepsilon_{kl}(t) + \varepsilon_{kl}(t), \quad (1)$$

где  $\tilde{V}_{kl}$  — видность, измеренная антеннами k и l;  $V_{kl}$  — реальная видность;  $g_k$  — комплексный коэффициент передачи k-й антенны;  $G_{kl}$  — ошибка в измеренной видности, не разлагаемая на множители, связанные с антеннами;  $\varepsilon_{kl}$  — аддитивная постоянная составляющая для пары антенн k и l;  $\varepsilon_{kl}$  — тепловой шум с нулевым средним [Томпсон и др., 2003; Cornwell, Fomalont, 1989]. Пренебрегая ошибками, относящимися к конкретной паре антенн k, l, запишем уравнение для видности в упрощенном виде:

$$\tilde{V}_{kl}(t) = g_k(t)g_l^*(t)V_{kl}(t) + \epsilon_{kl}(t).$$
(2)

Калибровка сводится к решению системы уравнений (2) относительно g. Обычно количество уравнений многократно превышает количество неизвестных и в решении участвуют все возможные избыточные видности для уменьшения влияния шума. Для упрощения дальнейшего анализа далее мы будем считать отношение сигнал/шум достаточно высоким, чтобы можно было пренебречь членами  $\epsilon_{kl}$ . Наиболее простой метод решения системы уравнений (2) заключается во взятии логарифма от всех величин, что позволяет записать независимые линейные уравнения для фаз и амплитуд [Wieringa, 1992; Liu et al., 2010]. Коэффициенты передачи антенн и видности можно представить в виде

$$g_k(t) = e^{a_k(t) + i\phi_k(t)},$$
 (3)

$$V_{kl}(t) = e^{S_{kl}(t) + i\psi_{kl}(t)}.$$
(4)

Тогда выражение (2) после взятия логарифма будет выглядеть следующим образом:

$$S_{kl}(t) + i\tilde{\psi}_{kl}(t) = a_k(t) + a_l(t) + S_{kl}(t) + i(\phi_k(t) - \phi_l(t) + \psi_{kl}(t)).$$
(5)

Такой вид дает возможность разделить уравнения для фаз и амплитуд и выполнить калибровку независимо:

$$\tilde{\Psi}_{kl}(t) = \phi_k(t) - \phi_l(t) + \Psi_{kl}(t), \tag{6}$$

$$S_{kl}(t) = a_k(t) + a_l(t) + S_{kl}(t).$$
(7)

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАЛИБРОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗБЫТОЧНОСТИ ДЛЯ СРГ-48

Использование избыточности антенной решетки подразумевает, что в систему уравнений будут входить «избыточные» видности, т. е. видности, которые измеряются многократно различными, но одинаково расположенными парами антенн. СРГ-48 — Т-образная эквидистантная антенная решетка с минимальной базой 4.9 м, состоящая из лучей Восток-Запад (32 антенны) и Юг (16 антенн). Для построения изображения используются «перекрестные» видности, т. е. видности, измеренные антеннами разных лучей. Избыточные видности измеряются только для калибровки. Лучи не имеют общих антенн, так как пересекаются на половине базы, поэтому системы уравнений для этих лучей независимы. Рутинная фазовая калибровка состоит в решении двух систем уравнений для избыточных видностей и последующей коррекции перекрестных видностей с помощью найденных фаз антенн. Максимально возможное количество уравнений для одного луча определяется как N(N-1)/2, где N — количество антенн в луче. Калибровочным источником для СРГ-48 является само Солнце, поскольку чувствительность СРГ-48 не позволяет наблюдать космические точечные источники. Для устойчивости решения входящие в систему уравнений видности должны быть измерены с приемлемым отношением сигнал/шум s/n > 5 [Wieringa, 1992; Hjellming, Basart, 1982]. Солнечный диск имеет спадающий пространственный спектр, поэтому уровень сигнала на разных парах антенн будет отличаться в зависимости от длины базы. Как правило, самый сильный сигнал регистрируется на самых коротких базах, а с увеличением базы уровень сигнала резко падает, поэтому для фазовой калибровки СРГ-48 используются только видности, измеренные парами соседних антенн. Количество измеряемых видностей ограничено также аппаратными ресурсами коррелятора СРГ-48. Количество уравнений при использовании только самых коротких баз будет N-1. Далее будет показано, что такой ограниченный набор уравнений дает приемлемое для построения изображений решение для фаз, но для амплитуд требуется дополнительный набор уравнений.

Для иллюстрации рассмотрим решетку из четырех антенн, расположенных вдоль одной линии на одинаковом расстоянии друг от друга. На примере этой решетки опишем методику калибровки, используемую для СРГ-48. Составим систему уравнений вида (6) для самых коротких баз, т. е. для l=k+1. В системе уравнений будет участвовать только одна уникальная фаза видности, которую обозначим  $\psi$ . Запишем систему уравнений для фаз в матричном виде

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\psi}_{12} \\ \tilde{\psi}_{23} \\ \tilde{\psi}_{34} \end{pmatrix}.$$
(8)

Обозначив матрицу коэффициентов  $\mathbf{P}_1$ , вектор неизвестных фаз **x**, а результирующий вектор **d**, выражение (8) можно записать более коротко:  $\mathbf{P}_1\mathbf{x}=\mathbf{d}$ . Очевидно, система (8) имеет бесконечное множество решений, так как содержит пять неизвестных и три уравнения. Выражаясь иначе, существует вектор или семейство векторов, принадлежащих нулевому пространству матрицы  $\mathbf{P}_1$ . Это означает, что при перемножении такого вектора с матрицей  $\mathbf{P}_1$  результирующий вектор будет нулевым. Следовательно, будучи прибавленным к найденному решению системы уравнений (8), этот вектор не окажет никакого влияния. Семейство векторов, принадлежащих нулевому пространству матрицы  $\mathbf{P}_1$ , имеет вид

$$\begin{pmatrix} \phi_{1} \\ \phi_{2} \\ \phi_{3} \\ \phi_{4} \\ \psi \end{pmatrix} = C_{1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + C_{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix},$$
 (9)

где C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> — произвольные константы. Добавление первой части вектора (9) к решению ( $C_1 \neq 0$ ;  $C_2 = 0$ ) соответствует добавлению константы ко всем фазам коэффициентов передачи антенн, что не играет роли для коррекции видностей, измеренных вдоль одного луча, так как в системе уравнений (8) фигурируют только разности фаз. Но, как было сказано выше, СРГ-48 состоит из двух лучей, не имеющих общих антенн, и в решениях для разных лучей константы С1 в общем случае будут разными. Это приведет к постоянной добавке к фазам перекрестных видностей, что при построении изображения будет выражаться в «перекосе» яркости по солнечному диску и небу. Эта неопределенность может корректироваться с помощью анализа изображения и его гистограммы либо с помощью добавки уравнения для самой короткой перекрестной видности и связывания двух систем уравнений в одну. Однако последний способ требует предположения о фазе перекрестной видности, что также может быть источником ошибки. Вторая часть вектора (9) ( $C_1=0$ ;  $C_2\neq 0$ ) соответствует внесению линейного наклона в фазы коэффициентов передачи антенн, что при последующей коррекции перекрестных видностей приведет к сдвигу всего изображения относительно фазового центра. Это не влияет на динамический диапазон изображения и устраняется при дальнейшей обработке с помощью процедуры центрирования солнечного диска.

Применим эту методику для амплитудной калибровки. Система уравнений для нашего примера решетки из четырех антенн будет аналогична системе (8), за исключением знаков:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{S}_{12} \\ \tilde{S}_{23} \\ \tilde{S}_{34} \end{pmatrix}.$$
 (10)

Матрицу обозначим  $A_1$ . Семейство векторов, принадлежащих нулевому пространству матрицы  $A_1$ , как и в случае матрицы  $P_1$  для фаз, будет состоять из двух частей:

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ S \end{pmatrix} = C_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -2 \end{pmatrix} + C_2 \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$
(11)

Нужно помнить, что в данном случае мы работаем с логарифмами амплитуд, поэтому прибавление в действительности означает умножение. Добавление первой части вектора (11) к решению равносильно умножению модулей коэффициентов передачи всех антенн на произвольную константу и одновременное деление амплитуды реальной видности на квадрат этой константы. Следовательно, при коррекции все перекрестные видности будут умножены на одинаковые произвольные множители, реально состоящие из двух множителей для разных лучей, что повлечет за собой изменение интеграла по изображению, соответствующего полному потоку излучения от Солнца на данной частоте. Привязка изображения к полному потоку производится при дальнейшей обработке путем привязки яркостной температуры диска Солнца к известному значению. По этой причине умножение видностей на константу не влияет на качество изображения. Добавление второй части вектора (11) к решению означает умножение модулей коэффициентов передачи всех антенн с четными индексами и деление модулей коэффициентов передачи всех антенн с нечетными индексами на константу, что приведет к появлению гребенки на спектральной плоскости (ии-плоскости). Гребенка в спектре усиливает самые дальние боковые лепестки диаграммы направленности и формирует ложные изображения, которые могут перекрываться с настоящим изображением.

Решение, содержащее подобную неопределенность, будет существенно ограничивать динамический диапазон изображения. Анализируя левую часть вектора (11), можно увидеть, что неопределенность в виде гребенки возникает из-за того, что в системе уравнений (10) мы всегда имеем дело с суммой логарифмов модулей коэффициентов передачи двух соседних антенн. Отсюда можно предположить, что добавление уравнений для пар антенн с удвоенным шагом (1–3 и 2–4) устранит эту неопределенность. Добавим два новых уравнения к системе (10). Появляется также новая неизвестная амплитуда видности, для самых коротких баз обозначим ее  $S_1$ , а для удвоенных баз —  $S_2$ .

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{S}_{12} \\ \tilde{S}_{23} \\ \tilde{S}_{34} \\ \tilde{S}_{13} \\ \tilde{S}_{24} \end{pmatrix}.$$
(12)

Из вида вектора, принадлежащего нулевому пространству данной матрицы, можно понять, что единственно возможной неопределенностью теперь останется только константа

$$\begin{pmatrix} a_{1} \\ a_{2} \\ a_{3} \\ a_{4} \\ S_{1} \\ S_{2} \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -2 \\ -2 \end{pmatrix}.$$
(13)

Как говорилось выше, наличие константы в видностях не играет никакой роли, поэтому теперь решение для амплитуд можно считать точным.

Следует отметить, что дополнительные уравнения кардинальным образом меняют точность амплитудной калибровки, а для фаз уравнения с удвоенными базами никак не повлияют на вид вектора (9). Это обусловлено тем, что дополнительные уравнения для фаз не будут линейно независимыми. Более того, для решения системы с уравнениями для разных длин баз логарифмический подход требует выполнения «развертывания» фазы (unwrap) — процедуры, обратной делению по модулю на  $2\pi$ , чтобы поведение правой части уравнения (6) было линейным. При большом разбросе фаз коэффициентов передачи антенн, а также при различных значениях фаз солнечных видностей это может оказаться затруднительным. В таких случаях предпочтительнее использовать нелинейные методы и решать систему уравнений вида (2) в комплексном виде, несмотря на то, что они требуют больше вычислительных ресурсов.

По описанным выше причинам выбор уравнений только для самых коротких баз с учетом их наибольшего отношения сигнал/шум для фазовой калибровки данных СРГ-48 кажется оптимальным. Для амплитудной калибровки требуется дополнительное использование уравнений для удвоенных баз. Однако стоит иметь ввиду, что уровень сигнала на удвоенных базах может значительно меняться с течением времени. На рис. 1 показано поведение модуля функции видности для самых коротких удвоенных баз, измеренной на разных частотах с начала наблюдений до кульминации. Эти базы измеряют низкочастотную часть пространственного спектра, где доминирует отклик на солнечный диск. В области пространственных частот отклик на круглый диск представляет собой диск Эйри — функцию Бесселя первого рода, деленную на свой аргумент. В течение дня положение вектора базы на спектральной плоскости меняется и в некоторые моменты оказывается вблизи первого и второго нулей функции Бесселя. Это приводит к тому, что отношение сигнал/шум падает ниже 5 и видности становятся непригодны для калибровки. Для таких случаев предпочтительнее использовать калибровку, полученную в ближайший момент времени, когда все используемые в системе уравнений видности имеют достаточное соотношение сигнал/шум.

### АМПЛИТУДНАЯ КАЛИБРОВКА ДАННЫХ СРГ-48

Результат, описанный в предыдущем разделе, можно показать на модельных данных, которые представляют вычисленные компоненты пространственного спектра модели Солнца, соответствующие перекрестным и избыточным парам антенн для определенного момента времени. Каждая спектральная компонента умножается на заданные комплексные коэффициенты передачи антенн, измеряющих эту компоненту. К полученному набору видностей применяется описанный выше метод калибровки с целью вычисления коэффициентов передачи и восстановления исходных спектральных компонент. На рис. 2 показан результат вычисления коэффициентов передачи для 32 антенн луча Восток-Запад. Гребенка в явном виде появляется при делении исходных модулей коэффициентов передачи антенн на модули коэффициентов передачи, вычисленные с использованием только самых коротких баз. При добавлении уравнений для удвоенных баз остается только константа.

Избыточные видности для пар антенн с удвоенным шагом регистрируются на СРГ-48 с 9 марта 2020 г. Данные, записанные ранее, в основном использовались без амплитудной калибровки. На рис. 3 показано влияние амплитудной калибровки данных на изображение Солнца и его гистограмму, которая используется для привязки к яркостным температурам. Изображения показаны в системе координат направляющих косинусов (l, m). Изображения Солнца, формирующиеся на соседних максимумах диаграммы направленности СРГ-48, имеют обратный знак, что обусловлено конфигурацией решетки. На изображениях с фазовой коррекцией и амплитудной коррекцией по коротким базам видны артефакты, которые искажают изображения и их гистограммы. Это снижает точность привязки яркостных температур диска и определения яркостных температур источников. На более высоких частотах иска-



Рис. 1. Изменение уровня сигнала на разных базах лучей Восток–Запад и Юг с начала наблюдений до момента кульминации Солнца для 10 мая 2020 г. Синий цвет соответствует частоте 4375 МГц, оранжевый — 7700 МГц. Для каждой кривой приведены минимальное и максимальное значения отношения сигнал/шум



*Рис.* 2. Результат моделирования амплитудной калибровки. Слева: точки, соединенные красным пунктиром — исходные модули коэффициентов передачи антенн; плюсы, соединенные зеленым пунктиром — вычисленные амплитуды антенн с использованием только коротких баз; треугольники, соединенные синим пунктиром — их частное, которое показывает, что решение отличается от исходных значений на константу и гребенку. Справа: то же для решения с добавлением удвоенных баз

жения температур на диске могут быть еще сильнее, так как артефакты будут перекрываться с истинным изображением. Последнее изображение, полученное с применением амплитудной калибровки по коротким и удвоенным базам, не содержит таких артефактов. Это означает, что изображение приближено к свертке с идеальной диаграммой направленности и процедура чистки будет работать более корректно. На рис. 4 показаны грязное и чистое изображения спокойного Солнца, полученные 3 мая 2020 г. на частоте 6125 МГц. Чистка такого протяженного объекта, как Солнце, является отдельной сложной задачей и выхо-



*Рис. 3.* Влияние амплитудной калибровки на изображение. Слева — изображение после фазовой калибровки, в центре — изображение после фазовой и амплитудной калибровок с использованием только самых коротких баз, справа — изображение после фазовой и амплитудной калибровок с использованием самых коротких и удвоенных баз; под каждым изображение показаны их гистограммы. Изображения получены 14 марта 2020 г. на частоте 4300 МГц



*Рис. 4.* Изображения Солнца для 3 мая 2020 г. Слева — грязное изображение, полученное на частоте 6125 МГц после фазовой и амплитудной калибровок, в центре — то же изображение после чистки ярких источников и диска, справа — изображение SDO/AIA на длине волны 304 Å. В левом нижнем углу показан размер диаграммы направленности СРГ-48. Время накопления составляет 15 с

дит за рамки этой работы. В данном случае использовался простой алгоритм вычитания отклика на диск и чистки оставшихся ярких областей алгоритмом Хёгбома [Högbom, 1974]. Для сравнения показано изображение для того же дня, полученное инструментом SDO/AIA на длине волны 304 Å. Динамический диапазон изображений СРГ-48 — 50:1 и 156:1 соответственно. Без амплитудной калибровки и чистки динамический диапазон составляет 5:1. На рис. 5 показан пример чистки яркого источника во время вспышки класса М1.2 без амплитудной калибровки (слева) и с амплитудной калибровкой (справа). Изображение, полученное с применением только фазовой коррекции, содержит множество остаточных боковых лепестков. Амплитудная калибровка позволяет подавить боковые лепестки и увеличить динамический диапазон в шесть раз. Отдельно стоит отметить, что без амплитудной калибровки антенная температура источника оказывается заниженной на 18 %. На изображениях присутствует больше шумов, чем на рис. 4, так как использовалось минимально возможное время накопления. Остаточные боковые лепестки на изображении с фазовой и амплитудной калибровками могут быть вызваны высокочастотными гармоническими искажениями в видностях (см. рис. 1,) которые имеют аппаратное происхождение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализована методика амплитудной калибровки коэффициентов передачи антенн СРГ-48. Аналитически и на модельных данных показано, что для получения приемлемого изображения требуется калибровка с использованием видностей, измеренных на самых коротких и удвоенных относительно них базах. Показан результат калибровки амплитуд на реальных данных СРГ-48. SRH 4375 MHz (phase)

SRH 4375 MHz (phase and amp)



*Рис. 5.* Чистые изображения вспышки класса М1.2 29 мая 2020 г. в 07:22 UT на частоте 4375 МГц. Слева — изображение с фазовой коррекцией, справа — изображение с фазовой и амплитудной коррекцией. Время накопления 0.14 с. Максимальная антенная температура вспышечного источника — 492·10<sup>3</sup> К и 605·10<sup>3</sup> К соответственно. Динамический диапазон — 47:1 и 290:1 соответственно

Работа выполнена частично в рамках Государственного задания на 2021 г. № 075-00374-21-00 от 24.12.2020 «Методы и инструменты астрофизического эксперимента» (уникальный номер 0278-2021-0010, регистрационный номер ЦИТиС 121040600115-2), частично — за счет средств Российского научного фонда (проект №18-12-00172).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С.37–50. DOI: 10.12737/szf-62202003.

Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты. *Солнечно-земная физика.* 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16. DOI: 10.12737/24347.

Томпсон А.Р., Моран Дж.М., Свенсон Дж.У., мл. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Мир, 1989. 568 с.

Cornwell T., Fomalont E.B. Self-calibration. *Synthesis imaging in radio astronomy. A Collection of Lectures from the Third NRAO Synthesis Imaging Summer School.* Published by the Astronomical Society of the Pacific. Vol. 6. P. 185. San Francisco, 1989.

Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., et al. The Siberian Solar Radio Telescope: the current state of the instrument, observations, and data. *Solar Phys.* 2003. Vol. 216, iss. 1. P. 239–272. DOI: 10.1023/A:1026153410061.

Hjellming R.M., Basart J.P. The theory of the instrument. Introduction to the NRA0 Very Large Array. Ch. 2. NRAO, 1982.

Högbom J.A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines. *Astron. Astrophys. Suppl.* 1974, Vol. 15, p. 417.

Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F. Gubin A.V. The multifrequency Siberian Radioheliograph. *Solar Phys.* 2012. Vol. 280, iss. 2. P. 651–661. DOI: 10.1007/s11207-012-0008-7.

Liu A., Tegmark M., Morrison S., Lutomirski A., Zaldarriaga M. *Precision Calibration of Radio Interferometers Using Redundant Baselines*. 2010. arXiv:1001.5268. DOI: 10.1111/j. 1365-2966.2010.17174.x.

Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph. *Proc. IEEE*. 1994. Vol. 82, iss. 5. P. 705–713.

Noordam J., de Bruyn A. High dynamic range mapping of strong radio sources, with application to 3C84. *Nature*. 1982. Vol. 299, iss. 5884, pp. 597–600. DOI: 10.1038/299597a0.

Perley R.A. High Dynamic Range Imaging. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II, A Collection of Lectures from the Sixth NRAO/NMIMT Synthesis Imaging Summer School. ASP Conference Ser., 1999. Vol. 180. P. 275.

Wieringa M.H. An investigation of the telescope based on calibration methods 'redundancy' and 'self-cal'. *Experimental Astronomy*. 1992. Vol. 2, P. 203–225. DOI: 10.1007/BF 00420576.

#### Как цитировать эту статью:

Глоба М.В., Лесовой С.В. Калибровка амплитуд коэффициентов передачи антенн Сибирского радиогелиографа с использованием избыточности. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 104–110. DOI: 10.12737/szf-74202111.