

САМОКАЛИБРОВКА СОЛНЕЧНЫХ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

М.В. Глоба, С.В. Лесовой

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

SELF-CALIBRATION OF SOLAR RADIO INTERFEROMETERS AND ITS APPLICATION FOR SIBERIAN RADIOHELIOGRAPH

M.V. Globa, S.V. Lesovoi

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

Аннотация. В работе описана методика самокалибровки данных, получаемых солнечными радиоинтерферометрами. Основная проблема при получении изображений в радиоинтерферометрии — корректировка комплексных коэффициентов передачи антенн (главным образом, их фаз), которые вносят искажения в измеряемые отсчеты функции видности. Самокалибровка подразумевает получение значений комплексных коэффициентов передачи антенн из самих данных при наличии некоторой модели наблюдаемого объекта. Рассмотрены особенности и ограничения ее использования для наблюдений Солнца. Приводятся первые результаты применения метода самокалибровки на модельных и реальных данных Сибирского радиогелиографа.

Ключевые слова: самокалибровка, радиоинтерферометрия, солнечные радиотелескопы.

Abstract. The paper describes the self-calibration of solar radio interferometer data. The main problem in obtaining images in radio interferometry is the correction for the complex antenna gains (mainly their phases), which corrupt the measured visibilities. Self-calibration implies obtaining the antenna gains from the data itself using some model of the observed object. The features and limitations of its use for observations of the Sun are considered. The first results of applying the self-calibration on model and real data of the Siberian radio heliograph are given.

Keywords: self-calibration, radio interferometry, solar radio telescopes.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоинтерферометры — инструменты, состоящие из двух и более антенн и измеряющие функцию взаимной когерентности (видность) сигналов от каждой пары антенн. Каждая видность соответствует определенной компоненте пространственного спектра распределения радиояркости по углу. Измеренная видность является произведением реальной видности и комплексных коэффициентов передачи антенн, поэтому перед построением изображения необходимо вычислить коэффициенты передачи и скорректировать измеренную величину. Обычно для их вычисления проводятся наблюдения калибровочных источников, либо, если антенная решетка является избыточной, то есть содержит несколько одинаковых баз, коэффициенты передачи могут вычисляться без дополнительных наблюдений. Однако эти методы не всегда дают желаемую точность, поэтому для уточнения полученной калибровки и улучшения качества изображений затем используется самокалибровка. Методика самокалибровки была разработана в 80-х гг. прошлого века и изначально применялась на звездных радиотелескопах, таких как Very Large Array (VLA) и Jodrell Bank Multi-Telescope Radio-linked Interferometer (MTRLI), [Schwab, 1981; Cornwell, Wilkinson, 1984]. Термин «самокалибровка» был выбран для того, чтобы подчеркнуть отличие метода от стандартной калибровки с помощью наблюдения калибровочных источников с известным положением, потоком и структурой. Самокалибровка производится по данным наблюдений самого интересующего объекта, для которого перечисленные параметры неизвестны или известны с меньшей степенью достоверности.

Основная трудность при выполнении самокалибровки заключается в выборе начальной модели — ожидаемого распределения яркости на наблюдаемом участке неба. Поэтому самокалибровка, как правило, выполняется в несколько итераций, с последовательным уточнением модели. Самокалибровка позволяет существенно повысить динамический диапазон изображения — величину, которая широко используется для оценки соответствия полученного изображения реальному распределению яркости на выбранном участке небесной сферы и определяется как отношение максимальной яркости к среднеквадратичному шуму на небе.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ САМОКАЛИБРОВКИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Методика самокалибровки описана в обзоре [Pearson, Readhead, 1984]. В общем случае суть самокалибровки сводится к следующему. Видности, измеряемые интерферометром, можно представить в виде:

$$\tilde{V}_{ij}(t) = g_i(t)g_j^*(t)G_{ij}(t)V_{ij}(t) + \varepsilon_{ij}(t) + \epsilon_{ij}(t), \quad (1)$$

где i и j — индексы антенн, \tilde{V} — измеренная видность, g — комплексный коэффициент передачи антенны, G — часть коэффициента передачи, не разлагаемая на множители, V — реальная видность, ε — аддитивный сдвиг, ϵ — шум с нулевым средним. Для простоты обычно выражение (1) рассматривается в виде:

$$\tilde{V}_{ij}(t) = g_i(t)g_j^*(t)V_{ij}(t) + \epsilon_{ij}(t). \quad (2)$$

При самокалибровке коэффициенты передачи являются свободными параметрами, которые подбираются путем минимизации выражения:

$$S = \sum_{i,j} w_{ij}(t) |\tilde{V}_{ij}(t) - g_i(t)g_j^*(t)\tilde{V}_{ij}(t)|^2 / 2, \quad (3)$$

где \tilde{V} — модельная видность, получаемая путем преобразования Фурье от модельного распределения яркости, w — весовая функция. Вся процедура состоит из следующих шагов:

1. Подобрать модель распределения яркости на небе.
2. Вычислить модельные видности и, подставив их в выражение (3), найти коэффициенты передачи антенн.

3. Скорректировать измеренные видности на коэффициенты передачи и построить изображения, используя какой-либо метод чистки.

4. Использовать компоненты модели, получаемой при чистке, в качестве нового модельного распределения яркости.

5. Если результат неудовлетворителен, вернуться к шагу 2.

Если модель распределения яркости известна с достаточной точностью (например, для неразрешенных источников), то достаточно выполнить эту процедуру один раз. Если же источник представляет собой распределенную структуру, то обычно выполняется несколько итераций с постепенным уточнением модели.

Как правило, для получения изображений с помощью апертурного синтеза сигнал накапливается в течение нескольких часов, что позволяет повысить отношение сигнал-шум и лучше заполнить uv -плоскость. Солнце — нестационарный радиоисточник, и мощность его излучения может за несколько секунд измениться в тысячи раз. Поэтому для изучения динамики солнечных вспышек и эруптивных событий солнечные радиointерферометры должны иметь секундное временное разрешение и иметь линейные характеристики в широком диапазоне входных мощностей. Поскольку имеется требование к временному разрешению, то нет возможности повысить чувствительность за счет длительного накопления сигнала. Поэтому при слабой активности на длинных базах, измеряющих высокочастотные компоненты пространственного спектра изображения, уровень сигнала может быть крайне низким. По этой причине возможности применения самокалибровки для радиointерферометрических наблюдений Солнца несколько ограничены, прежде всего, из-за низкого соотношения сигнал-шум на длинных базах при отсутствии сильной активности. Также затруднительным является подбор начальной модели распределения яркости.

Самокалибровка в основном используется для вспышек, так как во время вспышек появляются яркие компактные источники излучения, которые обеспечивают наличие сильного сигнала на всех антенных базах, а также из-за того, что во время вспышки упрощается выбор начальной модели, зачастую подходит и модель точечного источника.

Калибровка коэффициентов передачи антенн радиointерферометров, наблюдающих Солнце, может выполняться с использованием калибровочных косми-

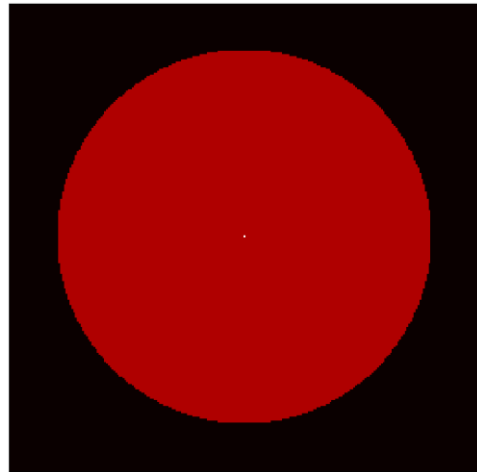


Рис. 1. Модельное изображения солнечного диска с ярким точечным источником в центре. Отношение яркостных температур источника и диска — 1000:1

ческих источников, однако, источники должны быть достаточно удалены от Солнца, чтобы оно не попадало в диаграмму направленности антенны, а также должны быть достаточно мощными, потому что при наблюдении одновременно с Солнцем сигнал от него может попадать в боковые лепестки диаграммы направленности [Breitling et al., 2015; Mondal et al., 2019]. У инструментов, предназначенных только для наблюдения Солнца, как правило, недостаточно чувствительности для наблюдения калибровочных источников. Поэтому такие антенные решетки обычно проектируются с некоторой избыточностью [Nakajima et al., 1995], позволяющей получить коэффициенты передачи без калибровочных источников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМОКАЛИБРОВКИ НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ (СРГ)

СРГ — Т-образный радиointерферометр, состоящий из 48 параболических антенн, диапазон частот 4–8 ГГц, время накопления одного изображения 0.28 с, время обзора полной полосы частот зависит от числа частотных каналов [Лесовой и др., 2017]. Рутинная калибровка производится с использованием избыточности, так как расстояние между парами соседних антенн на одном луче одинаково и каждая такая пара измеряет одну и ту же видность. Коэффициенты передачи антенн для избыточных решеток получают путем составления и решения системы линейных уравнений [Arnot et al., 1985]. Но, поскольку у южного и восточно-западного лучей нет общих антенн, для них получаются независимые решения, которые будут отличаться на константу. Так как в измеренных функциях видности фигурируют только разности фаз, то решение системы уравнений получается с точностью до линейного наклона фазы, что означает произвольное положение источника без привязки к небесным координатам. Калибровка по космическим источникам не представляется возможной ввиду низкой чувствительности антенн СРГ, а также из-за ограничения на выбор калибровочных источников, накладываемого экваториальными монтёрками СРГ.

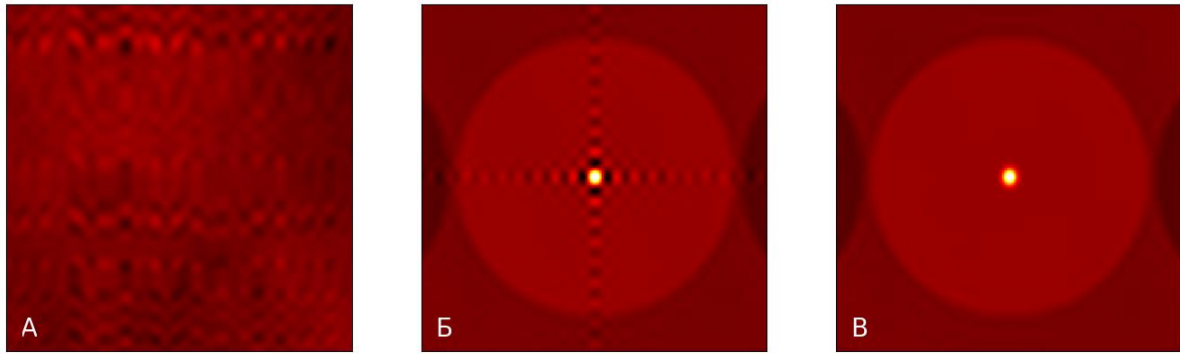


Рис. 2. А) — изображение, построенное из модельных видностей, без корректировки на коэффициенты передачи; Б) — «грязное» изображение после одной итерации самокалибровки при точно известной модели распределения яркости; В) — тоже, что и на Б), после чистки, динамический диапазон — 660:1

Самокалибровка не поддается аналитическому описанию, так как она использует нелинейные методы, например, чистку («CLEAN») [Högbom, 1974], и поэтому заранее нельзя оценить сходимость к стабильному решению для конкретных измерений. По этой причине сначала процесс самокалибровки был опробован на модельных данных. Модельное изображение представлено на рис. 1. Из модельного изображения вычислялись Фурье-компоненты, соответствующие имеющимся антенным базам СРГ, и каждая умножалась на коэффициенты передачи соответствующих антенн. Значения коэффициентов передачи выбирались исходя из реальных измерений — значения амплитуды случайно распределены в интервале от 1 до 1.2, значения фазы — в интервале от $-\pi$ до π радиан.

Данные и вся необходимая служебная информация (координаты наблюдателя, конфигурация антенной решетки и т. п.) сохраняются в формате Measurement Set 2 для последующей обработки в Common Astronomy Software Applications (CASA). CASA — программное обеспечение, предназначенное для обработки данных радиотелескопов [<https://casa.nrao.edu>]. В CASA содержится широкий набор инструментов для различного рода калибровок, в частности, для калибровки коэффициентов передачи антенн используется процедура `gaincal`. Вместе с данными записывается модель распределения яркости, используемая процедурой `gaincal` для калибровки коэффициентов передачи. Если модель определена точно, то есть используется изображение, из которого вычислялись видности, то достаточно один раз вычислить коэффициенты передачи, чтобы получить удовлетворительный результат (рис. 2). Качество калибровки обычно оценивают по остаточному уровню боковых лепестков на чистом изображении, для численной оценки можно использовать величину динамического диапазона. Для полученного изображения динамический диапазон равен 660:1. (Для оценки динамического диапазона обычно используют уровень шума на участке, где не должно быть излучения, но в данном случае уровень боковых лепестков высок вблизи яркого источника, а к краям изображения он сильно падает. Поэтому более наглядно оценивать динамический диапазон, используя уровень шума на диске, так как известно, что на

исходном модельном изображении яркость диска постоянна и любые шумы будут обусловлены процессом обработки.)

Но в общем случае точная модель неизвестна, и в качестве начальной модели можно использовать модель точечного источника (без диска). Обычно начальная модель отличается от искомого изображения, поэтому общепринятой практикой является на начальных итерациях осуществлять только фазовую калибровку коэффициентов передачи, так как результат амплитудной калибровки при незавершенной фазовой калибровке очень чувствителен к неточностям модели [Brogan, 2018]. Также на этом шаге можно использовать калибровку по избыточности. После корректировки строится чистое изображение, и в результате чистки формируется новая модель. Однако она нуждается в некоторой доработке перед последующим использованием. Солнечный диск — протяженный источник, и обычно порог чистки устанавливается таким образом, чтобы компоненты диска не попадали в модель. Но для того, чтобы получить модель для следующей итерации, порог нужно устанавливать ниже уровня диска, при этом точечные компоненты диска будут присутствовать в модели. Важно получить соотношение между яркостью источника и диска и их взаимное положение, после чего компоненты, полученные в результате чистки диска, исключаются и заменяются на модельный диск соответствующей яркости. Также из модели необходимо удалить все отрицательные компоненты, после чего модель можно использовать для следующей итерации. Изображения для трех итераций самокалибровки представлены на рис. 3.

Для иллюстрации процесса самокалибровки на реальных данных была выбрана вспышка 12 сентября 2017 г. Эта вспышка хороша тем, что она была очень яркая ($\sim 10^7$ К), а соответствующий ей микроволновый источник достаточно компактный, чтобы можно было в моделях представлять его точечным источником. Последовательность действий аналогична описанной выше, за исключением того, что перед самокалибровкой проводилась калибровка по избыточности (рис. 4). При обработке реальных данных диаграмма направленности подвержена влиянию шумов, не учтенных в модели. Поэтому даже после чистки остаточный уровень боковых лепестков нам-

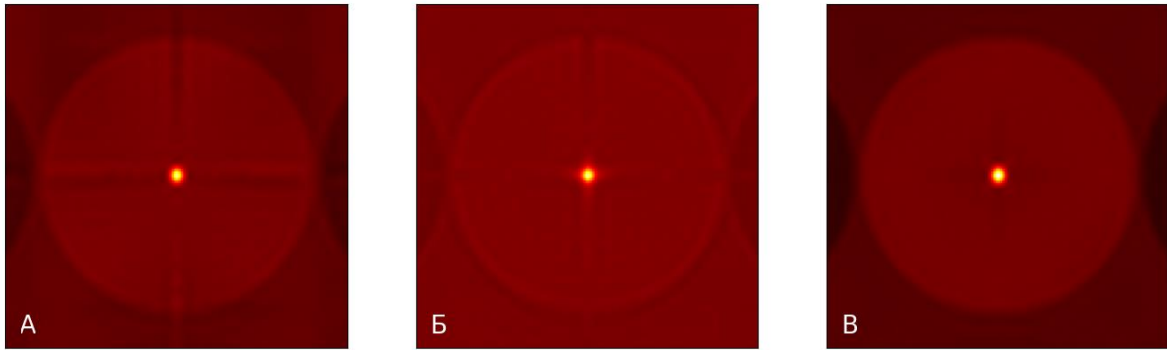


Рис. 3. А) — первая итерация: калибровка исходных фаз по модели точечного источника, динамический диапазон — 360:1; Б) — вторая итерация: калибровка коэффициентов передачи (амплитуд и фаз) по доработанной модели, полученной на первой итерации, динамический диапазон — 520:1; В) — третья итерация: калибровка коэффициентов передачи по доработанной модели, полученной на второй итерации, динамический диапазон — 530:1

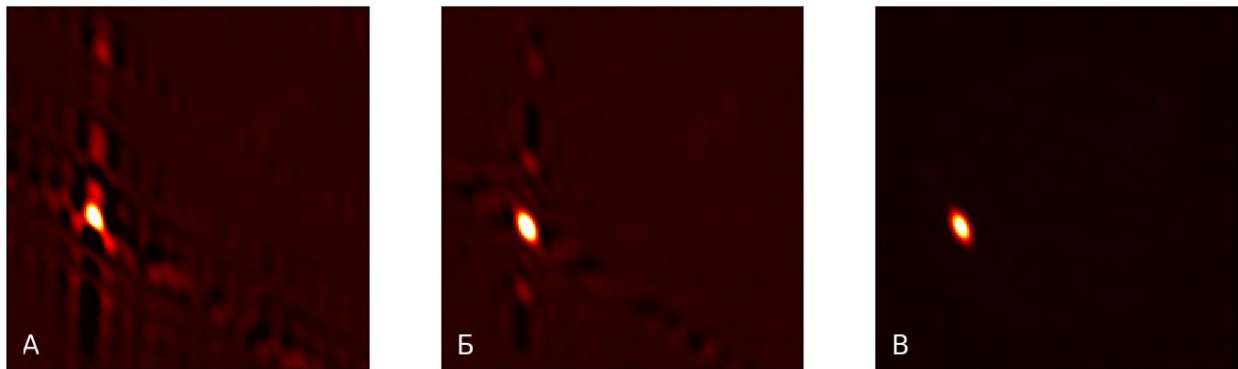


Рис. 4. А) — начальная подготовка данных: калибровка исходных фаз по избыточности, динамический диапазон — 90:1; Б) — первая итерация: калибровка фаз по модели точечного источника, динамический диапазон — 230:1; В) — вторая итерация: калибровка коэффициентов передачи по доработанной модели, полученной на первой итерации, динамический диапазон — 1200:1

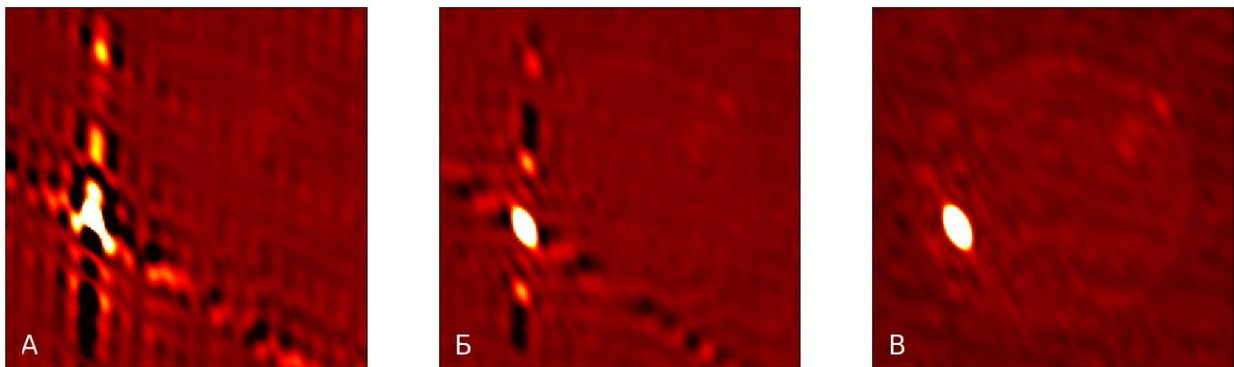


Рис. 5. То же, что на рис. 4, с другим контрастом

ного больше, чем на рис. 3. От боковых лепестков удалось избавиться на второй итерации, после чего стал хорошо виден солнечный диск, а также другие активные области (рис. 5). Дальнейшее уточнение модели не привело к существенному увеличению динамического диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самокалибровка изображений Солнца является крайне непростой задачей. Большое количество свободных параметров, а также необходимость в ручной доработке модели для следующей итерации самокалибровки, делают практически невозможной автоматиза-

цию этого процесса. Тем не менее, при тщательном подборе всех параметров можно существенно повысить динамический диапазон изображений для наблюдения отдельных событий. В дальнейшем планируется приблизить модельные данные к реальным за счет внесения различного рода ошибок, присущих такого рода измерениям, и выработать алгоритм для их устранения при самокалибровке данных СРГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Arnot R.N., Atherton D.P., Greenaway H.A., Noordam J.E. Phase closure in optical astronomy // *Traitement du Signal*. 1985. V. 2, № 2.

Breitling F., Mann G., Vocks Ch., Steinmetz M., Strassmeier K. The LOFAR Solar Imaging Pipeline and the LOFAR Solar Data Center // *Astronomy and Computing*. 2015. V. 13. DOI: [10.1016/j.ascom.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.ascom.2015.08.001).

Brogan L.C., Hunter T., Fomalont B.E. Advanced Gain Calibration Techniques in Radio Interferometry. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1805.05266.pdf> (дата обращения 29.05.2019).

Cornwell T.J., Wilkinson P.N. A new method for making maps with unstable radio interferometers // *Mon. Not. R. astr. Soc.* 1981. V. 196. P. 1067–1086.

Högbom J.A. Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. 1974. V. 15. P. 417.

Mondal S., Mohan A., Oberoi D., et al. Unsupervised Generation of High Dynamic Range Solar Images: A Novel Algorithm for Self-calibration of Interferometry Data // *The Astrophysical J.* 2019. V. 875. P. 97. DOI: [10.3847/1538-4357/ab0a01](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0a01).

Pearson T.J., Readhead A.C.S. Image Formation by Self-Calibration in Radio Astronomy // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 1984. V. 22:1. P. 97–130.

Schwab F.R. VLA scientific memorandum № 136. 1981. URL: https://library.nrao.edu/public/memos/vla/sci/VLAS_136.pdf (дата обращения 29.05.2019)

Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. New Nobeyama Radio Heliograph // *J. Astrophys. Astron. Suppl.* 1995. V. 16. P. 437–442.

URL: <https://casa.nrao.edu> (дата обращения 29.05.2019)..