

УДК 523.9–77, 520.8–17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА СОЛНЦЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600 В МНОГОАЗИМУТАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

© 2020 Л. В. Опейкина¹, В. Е. Абрамов-Максимов², В. Н. Боровик², В. Н. Черненко¹¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 19 февраля 2020 года; после доработки 24 апреля 2020 года; принята к публикации 24 апреля 2020 года

Приведено аналитическое описание метода определения координат солнечных радиоисточников по многоазимутальным наблюдениям на РАТАН-600. Рассмотрены модели смещения источника по скану в зависимости от азимута с учетом вращения Солнца и предложен способ оценки изменения скорости смещения, обусловленного вращением. Результаты применения метода продемонстрированы на примере определения координат одного из радиоисточников в активной области NOAA 11520. После устранения грубых ошибок в привязке сканов получены координаты, которые хорошо согласуются с наблюдательными данными. Обсуждаются ошибки координатной привязки сканов.

Ключевые слова: Солнце: радиоизлучение — методы: анализ данных

1. ВВЕДЕНИЕ

В результате единичного наблюдения на РАТАН-600 получается одномерный скан источника с умеренно высоким пространственным разрешением в направлении сканирования, что позволяет определить только одну координату источника в картинной плоскости. Для получения информации о второй координате нужны дополнительные наблюдения. Такими наблюдениями могут являться наблюдения в различных азимутах. При этом происходит разворот диаграммы направленности (ДН) по отношению к источнику на угол, зависящий от азимута, что дает возможность строить двумерные изображения источника методом восстановления по проекциям (Bates and McDonnell 1989, Pariiskii and Shivriv 1972), если форма ДН близка к “ножевой”. Имеется ряд более-менее успешных попыток построения изображений по таким наблюдениям в различных режимах работы радиотелескопа — в режиме “Южный сектор + Плоское зеркало” (ЮП) (Bogod et al. 2004, Minchenko 1986, Nindos et al. 1996), в режиме наблюдений стандартным сектором в азимутах (Minchenko 1983) и в режиме “Эстафета” (Golubchina et al. 2002, Minchenko 1983). Получение двумерных изображений решает проблему определения обеих координат источника, но регулярное получение изображений пока не вошло в практику. Поэтому остается актуальным определение координат источников более простым способом, основанным на том, что положение

источника на скане зависит от координат источника и от азимута наблюдений. В эпоху активных наблюдений на Большом Пулковском радиотелескопе (БПР), являющемся прототипом РАТАН-600, такой метод определения координат неоднократно применялся при анализе наблюдений как далеких радиоисточников (Pariiskii and Shivriv 1972), так и Солнца (Ikhsanova 1964). Продолжилось его применение и для обработки наблюдений на РАТАН-600 (Akhmedov et al. 1986, Golubchina et al. 1981).

Методика получения координат солнечных радиоисточников по наблюдениям в различных азимутах приведена, например, в Golubchina et al. (1981), Ikhsanova (1964). В этих работах для получения координат использовались геометрические построения, что было удобно в эпоху, когда записи радиоизлучения и оптические данные были представлены на бумажных носителях, а их обработка происходила вручную. При компьютерной обработке целесообразнее использовать аналитическое представление метода, которое в прежних работах практически не описано. В данной работе мы рассмотрим алгебраический вариант метода и результаты его применения к наблюдениям Солнца на РАТАН-600 в режиме ЮП.

Базовая часть процедуры получения координат из наблюдений под разными позиционными углами ДН проста. Однако вращение Солнца вносит искажения, которые нельзя точно учесть, поскольку

скорость вращения источника зависит от его координат, которые заранее неизвестны. Мы пытаемся применить упрощенный способ учета вращения, для обоснования которого используется моделирование кривых смещения координаты источника на скане в зависимости от азимута.

Описываемый здесь метод изначально предполагает, что координаты источника на скане определены с высокой точностью, что позволяет обходиться без регуляризирующих алгоритмов решения задачи. По существу, априорная информация о решении вводится на этапе подготовки сканов для измерений, в частности, в процедуре привязки центра скана по снимкам Солнца в оптическом диапазоне. Следует заметить, что в текущих наблюдениях Солнца в режиме ЮП имеются значительные ошибки координатной привязки сканов, которые обсуждаются в заключительной части работы.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Определим системы координат, которые будем использовать в данной работе. В качестве основной системы, в которой будут вычисляться координаты источника, выберем декартову прямоугольную систему координат, центр которой находится в центре Солнца, а оси x , y располагаются в картинной плоскости и ориентированы вдоль круга прямых восхождений (суточной параллели) и круга склонений соответственно. Ось z направлена на наблюдателя и проходит через видимый центр солнечного диска, поэтому координаты x , y центра диска в этой системе равны нулю. По аналогии с координатной системой, описанной в Blazhko (1979), будем называть ее стандартной. Хотя следует заметить, что в настоящее время термин “стандартная система координат” имеет и другое значение (Kulikovskij 2002).

Направление сканирования источников в режиме прохождения в любом из азимутов совпадает с осью x стандартной системы. Положение источника на скане зависит от его координат в картинной плоскости и от угла наклона “ножевой” диаграммы по отношению к линии сканирования (Рис. 1). По двум сканам, полученным с разными углами наклона диаграммы, можно вычислить координаты точки.

В то же время для координатной привязки скана, полученного с помощью “ножевой” диаграммы, удобно использовать систему координат, оси x , y которой ориентированы в картинной плоскости вдоль минимального и максимального размеров “ножа”. Если “нож” ДН представить бесконечно тонкой линией, то окажется, что в каждой точке скана суммируются только те точки изображения, которые имеют одинаковую координату x в такой системе. При наблюдениях в меридиане система,

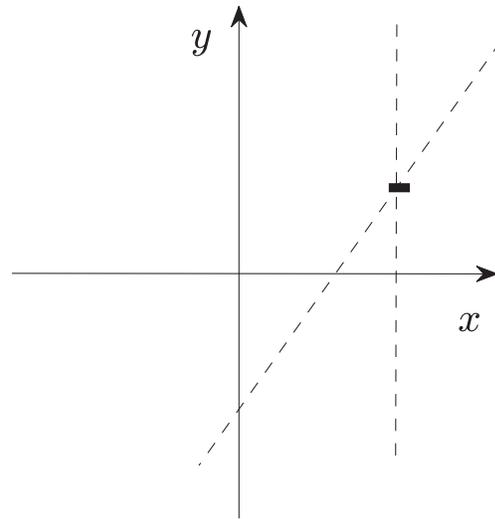


Рис. 1. Изменение положения точки на скане при сканировании диаграммами направленности, ориентированными под разными углами к стандартной системе координат.

ориентированная вдоль “ножа”, совпадает со стандартной, а в азимутах оси x , y такой системы повернуты по отношению к соответствующим осям стандартной системы на угол r . При этом центр системы и ось z совпадают с таковыми в стандартной системе.

Наблюдения Солнца на РАТАН-600 проводятся в режиме “Южный сектор + Плоское зеркало”. Геометрия антенной системы в этом режиме описана в (Bogod 1983, Shivgis 1980). В этих работах приведены формулы для угла наклона диаграммы к кругу склонений r . В частности, r может быть вычислен по формуле $\sin(r) = -\tan \delta \tan A_p$, где δ — склонение источника, а A_p — азимут облучателя. A_p равен азимуту вершины параболы, вдоль которой устанавливаются элементы кругового отражателя, и отсчитывается от точки юга к западу. Как видно из формулы, при наблюдениях Солнца вблизи равноденствий угол наклона близок к нулю, и рассматриваемая здесь методика определения координат применяться не может.

Пусть координаты источника в стандартной системе координат равны (x_1, y_1) . Сканы в двух произвольных азимутах дадут нам x -координаты этого источника в двух системах координат, развернутых относительно стандартной на r' и r'' . Обозначим координаты источника на скане как x_2 . Координаты x_2' и x_2'' можно выразить через искомые x_1 и y_1 :

$$\begin{aligned} x_2' &= x_1 \cos r' - y_1 \sin r', \\ x_2'' &= x_1 \cos r'' - y_1 \sin r''. \end{aligned} \quad (1)$$

Из этих уравнений находим x_1 и y_1 :

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{x_2'' \sin r' - x_2' \sin r''}{\sin r' \cos r'' - \sin r'' \cos r'}, \\ y_1 &= \frac{x_2'' \cos r' - x_2' \cos r''}{\sin r' \cos r'' - \sin r'' \cos r'}. \end{aligned} \quad (2)$$

Однако в случае солнечных источников задача осложняется тем, что координаты этих источников x_1, y_1 меняются от азимута к азимуту из-за вращения Солнца, причем скорость изменения координат зависит от самих координат. Поскольку координаты источника заранее неизвестны, то точно решить задачу нельзя. Здесь мы рассмотрим один из вариантов приближенного решения. Будем вычислять координаты x_1, y_1 на заданный момент времени, корректируя координаты x_2 на сканах так, чтобы привести их к тем значениям, которые наблюдались бы, если бы вращения не было. Оценить величину такой коррекции можно по приблизительным координатам источника.

Для учета вращения удобно использовать гелиографическую сферическую систему координат, определяющую широту (ϕ) и долготу (l) источника. Центр этой системы находится в центре Солнца, а оси, по отношению к которым определяются сферические координаты, расположены следующим образом. Ось y_h ориентирована вдоль оси вращения Солнца, оси x_h и z_h лежат в плоскости солнечного экватора. Ось z_h является проекцией оси z стандартной системы на плоскость экватора, а ось x_h лежит на пересечении плоскости экватора и картинной плоскости. При вращении Солнца широта источника остается неизменной, а долгота меняется со скоростью $v \sim 13.45 - 3 \sin \phi^2$ град/сутки (Allen 1973). Переход от стандартных координат к гелиографическим и обратно можно осуществить с помощью преобразования декартовых координат:

$$\begin{aligned} x &= x_h \cos P - y_h \sin P \cos B + z_h \sin P \sin B, \\ y &= x_h \sin P + y_h \cos P \cos B - z_h \cos P \sin B, \\ z &= y_h \sin B + z_h \cos B; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_h &= x \cos P + y \sin P, \\ y_h &= -x \sin P \cos B + y \cos P \cos B + z \sin B, \\ z_h &= x \sin P \sin B - y \cos P \sin B + z \cos B, \end{aligned}$$

где P — угол наклона оси вращения по отношению к кругу склонений (ось y стандартной системы координат), B — гелиографическая широта центра видимого диска, т.е. угол наклона оси вращения по отношению к картинной плоскости. Заметим, что стандартные координаты представлены в угловых единицах, но при переходе к гелиографическим координатам следует приводить их к относительным единицам, нормированным на радиус Солнца.

Высота источника над фотосферой может быть учтена соответствующим изменением радиуса. Также заметим, что рассмотренные выше системы координат правые.

При сравнении координат x_1, y_1 с изображениями Солнца, полученными на других инструментах, следует учитывать, что изображения могут быть представлены в системах координат, отличных от стандартной. Чаще всего используется проекционная декартова система, так называемая helioprojective-cartesian coordinate system (Thompson 2006), которая отличается от стандартной тем, что ее ось y совпадает в картинной плоскости с проекцией оси вращения Солнца, т.е. развернута относительно оси y стандартной системы на угол P .

3. УЧЕТ ВРАЩЕНИЯ СОЛНЦА

В режиме ЮП азимут облучателя A_p может изменяться в пределах $\pm 30^\circ$. Геометрия режима такова, что раньше по времени проходят наблюдения в $A_p = +30^\circ$, а разница между временем наблюдений в крайних азимутах составляет примерно 4.5 часов. Пренебречь вращением Солнца в течение такого промежутка времени нельзя, так как оно заметно меняет координату источника на скане по сравнению с таковой в отсутствие вращения. В соответствии с определениями, данными в разделе 2, будем обозначать координату на скане переменной x_2 . Напомним, что сканы в разных азимутах представлены в различных системах координат. Описываемый здесь способ учета вращения сводится к вычитанию из наблюдаемого значения x_2 составляющей, связанной с вращением. Чтобы составить представление об этой составляющей, рассмотрим примеры модельных кривых зависимости x_2 от A_p .

Число параметров, от которых зависит ход x_2 , из-за вращения Солнца увеличивается. Помимо координат источника (x_1, y_1) и позиционного угла диаграммы r , который, в свою очередь, зависит от склонения Солнца δ и азимута облучателя, координата x_2 будет зависеть также и от углов, характеризующих наклон оси вращения Солнца. Приведем примеры модельных кривых x_2 , дающие представление о разнообразии их формы и влиянии вращения. Координаты источника будем задавать в угловых секундах на момент наблюдений в азимуте $A_p = 0$. Видимый радиус Солнца равен $960''$.

Пусть $x_1 = 0$. В этом случае при отсутствии вращения, если знаки δ и координаты y_1 не совпадают, x_2 увеличивается со временем, а если совпадают — уменьшается. Вращение усложняет эту картину. Допустим, что углы P и B также равны нулю. Тогда в первом случае вращение только усиливает рост x_2 . Во втором случае вращение

работает против изменения x_2 , и в результате при небольших значениях y_1 координата на скане x_2 со временем может даже расти. Примеры зависимости x_2 от азимута облучателя A_p для случая $x_1 = 0$ и совпадения знаков y_1 и δ приведены на Рис. 2. На Рис. 2а показан ход кривых без учета вращения, на Рис. 2б — с учетом вращения. Сплошные кривые соответствует $y_1 = 50''$, штриховые — $y_1 = 100''$, штрих-пунктирные — $y_1 = 300''$. Видно, что для $y_1 = 50''$ из-за вращения ход кривой x_2 меняется на противоположный. Склонение для этих расчетов взято равным 23° (близко к максимальному склонению Солнца).

Еще один случай показан на Рис. 3. Если $y_1 = 0$ и отсутствует вращение, то для любых x_1 кривые x_2 зеркально симметричны относительно оси y (сплошные кривые). Вращение нарушает эту симметрию, а при небольших значениях x_1 кривые становятся монотонно растущими (штриховые кривые).

Мы не ставим задачу представить и описать все варианты кривых x_2 при различных параметрах и предполагаем, что обработка данных будет сопровождаться моделированием x_2 для каждого конкретного случая. При этом для реализации метода важно знать не саму кривую x_2 , а разницу между кривыми x_2 с вращением и без вращения. Обозначим эту разницу как Δx_2 . Моделирование показывает, что для большей части диска Солнца Δx_2 на протяжении всего времени наблюдений в азимутах в режиме ЮП ведет себя практически линейно. Примеры Δx_2 для точек с различными координатами приведены на Рис. 4. Таким образом, наблюдаемые значения x_2 можно представить как $x_2^0 + V_{x_2} dt$, где x_2^0 — это искомые значения x_2 без вращения, V_{x_2} — скорость изменения x_2 из-за вращения, которую можно считать постоянной в пределах временного интервала азимутальных наблюдений, dt — интервал времени между моментами прохождения источника в текущем азимуте и в азимуте, для которого ищутся координаты x_1, y_1 (например, для меридиана). Линейность Δx_2 заметно нарушается только вблизи лимба. Скорость V_{x_2} можно оценить как с помощью моделирования кривых x_2 , так и по формуле, представляющей собой первую производную x_2 по времени:

$$V_{x_2} = v \cos \phi R_\odot (\cos l (\cos P \cos r - \sin P \sin r) - \sin l \sin B (\sin P \cos r + \cos P \sin r)), \quad (4)$$

где v — это скорость дифференциального вращения Солнца, выраженная в радианах в единицу времени, R_\odot — радиус Солнца в размерных угловых единицах, например, в угловых секундах, ϕ и l — гелиографические широта и долгота источника,

r — позиционный угол ДН. Изменения V_{x_2} , связанные с изменением r , в режиме ЮП малы, и здесь мы их не учитываем.

Скорость V_{x_2} меняется с изменением координат достаточно медленно и для получения значений x_2^0 можно использовать значение скорости, вычисленное для приблизительного положения источника. Вариации скорости в пределах нескольких процентов к существенному изменению результата не приводят, что позволяет не учитывать то, что разные структуры солнечной атмосферы имеют немного различную скорость вращения, и то, что высота источника над фотосферой меняет скорость смещения источника по скану (Рис. 4б).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Рассмотрим применение метода на примере активной области NOAA 11520, которая наблюдалась на диске Солнца в июле 2012 года. 11 июля эта активная область (АО) находилась на небольшом расстоянии от центрального меридиана. Наблюдения проходили в 25 азимутах в пределах $\pm 24^\circ$ с интервалом 2° . Во время наблюдений АО 11520 была относительно спокойной, вспышек рентгеновского класса C и более мощных в ней не происходило, поэтому нет оснований предполагать, что максимумы на сканах смещались по каким-то иным причинам, кроме “проекций” и вращения. Для наблюдений использовался спектрально-поляризационный комплекс высокого разрешения с регистрацией право- и левополяризованного (R, L) излучения на 80 частотах в диапазоне 18.2–3 ГГц со спектральным разрешением примерно 1% (Bogod et al. 2011).

На Рис. 5а показаны изображение активной области, полученное с помощью космической обсерватории SDO (AIA/4500 Å)¹ а на Рис. 5б соответствующие ей участки радиосканов в R и L поляризации, полученные в азимуте $A_p = 0$ на частоте $f = 12.9$ ГГц. В головной части АО выделяются два крупных пятна одной полярности, расположенные практически в пределах одной полутени. Восточное пятно отмечено буквой E, а западное — W. Цифрами 1 и 2 отмечены два основных максимума на сканах активной области. Координаты x_2 для этих максимумов в зависимости от азимута показаны на Рис. 6а (частота 12.9 ГГц).

Из Рис. 6а видно, что отклонения наблюдаемых положений максимумов обоих источников от расчетных кривых достаточно велики. Это связано, в

¹<https://jsoc.stanford.edu/data/aia/synoptic/>

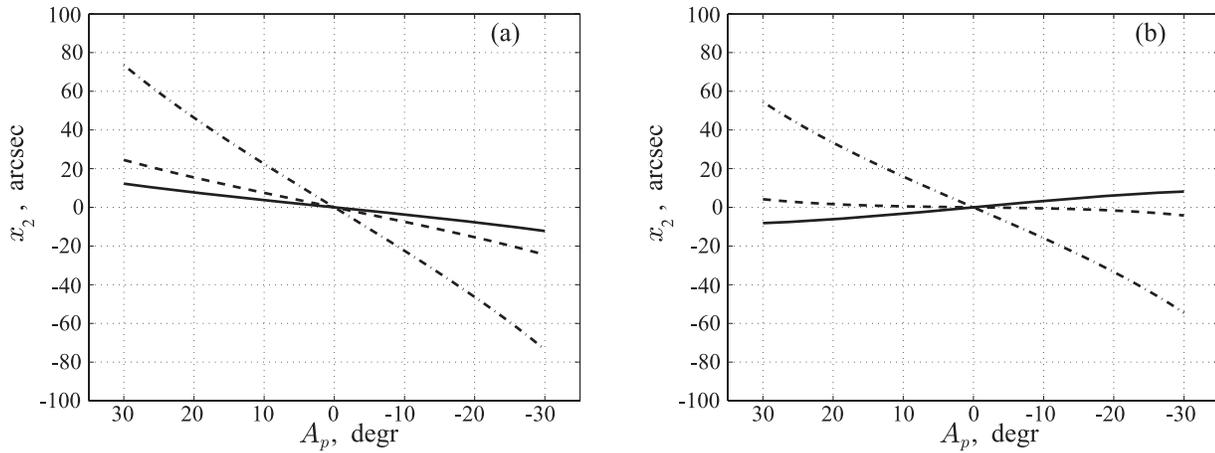


Рис. 2. Смещение источника по скану при наблюдениях в азимутах: а) без учета вращения Солнца, б) с учетом вращения. Во всех случаях координата x_1 равна 0, а y_1 меняется: $y_1 = 50''$ — сплошная линия, $y_1 = 100''$ — штриховая, $y_1 = 300''$ — штрих-пунктирная. Параметры $\delta = 23^\circ$, $P = 0^\circ$, $B = 0^\circ$.

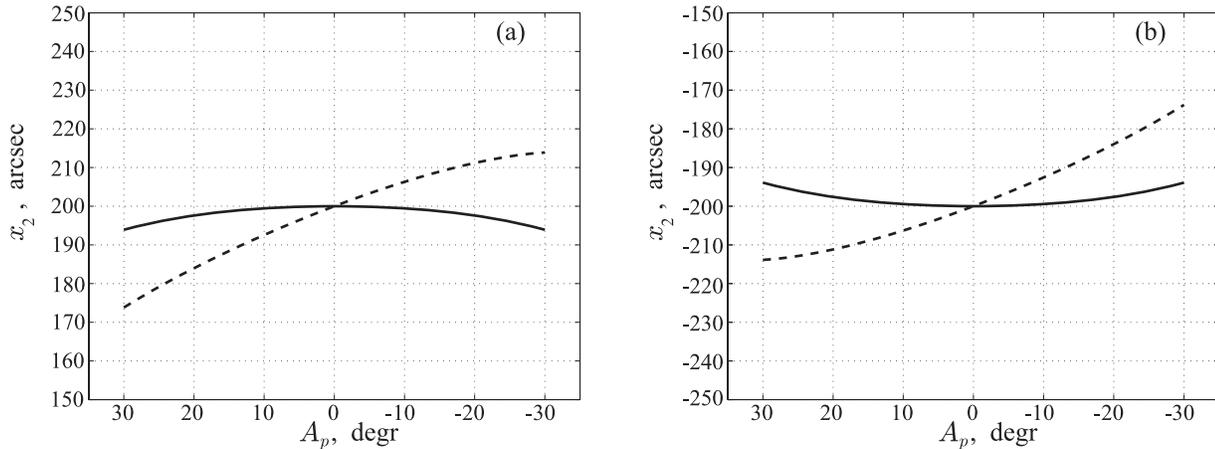


Рис. 3. Смещение источника по скану при наблюдениях в азимутах без учета вращения (сплошная кривая) и с учетом вращения (штриховая линия). Во всех случаях $y_1 = 0$, $\delta = 23^\circ$, $P = 0^\circ$, $B = 0^\circ$. а) $x_1 = 200''$, б) $x_1 = -200''$.

первую очередь, с тем, что, как правило, наблюдаемый центр Солнца на скане не совпадает с расчетным (Bogod et al. 2004, Tokhchukova 2011). Смещение центра необходимо предварительно скорректировать. В данной работе мы можем использовать источник 1 как опорный. Вся совокупность данных позволяет нам предположить, что этот источник относится к “пятенному” типу. Такие источники хорошо изучены, и можно исходить из того, что на коротких длинах волн их излучение выходит из областей, находящихся на небольшой высоте над пятнами (Akhmedov et al. 1982). Другими словами, мы должны сместить координаты всех точек на скане на такую величину, чтобы координаты максимума 1 совпали с расчетной кривой для центра пятна E. Величина смещения оценивалась по сканам на частоте 13.05 ГГц, в обеих поляризациях

использовалась одна и та же расчетная кривая. Заметим, что процедура коррекции центра скана возвращает центр координатной системы на ось y исходной для данного азимута системы координат, поэтому формулы (1) можно использовать без изменений. Положение максимума 2 после коррекции смещения на частоте 12.9 ГГц и расчетная кривая для центра пятна W показаны на Рис. 6б. Видно, что разброс точек уменьшился, но на расчетную кривую для центра пятна W они не попадают.

Перед вычислением координат значения x_2 были исправлены также и за вращение Солнца способом, описанным в разделе 3. Скорость смещения источника 2 по скану, обусловленная вращением, была оценена по координатам для центра пятна W и составила примерно $0.14''/\text{мин}$. Моделирование

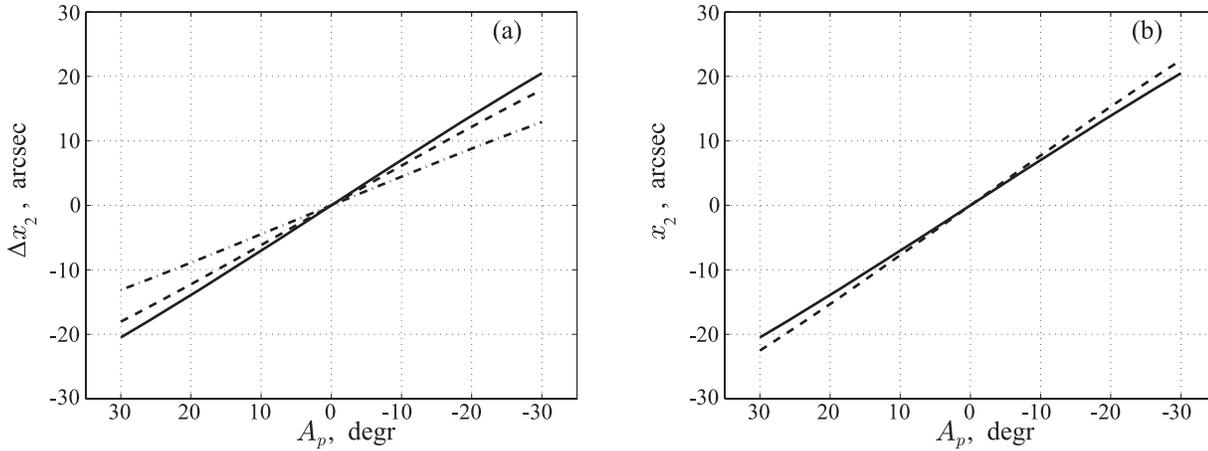


Рис. 4. а) Разница Δx_2 между координатой источника на скане без вращения и с вращением для источников с координатами $(0, 0)$ — сплошная линия, $(300'', 300'')$ — штриховая линия, $(500'', 500'')$ — штрих-пунктирная линия. б) Смещение по скану источника с координатами $(0, 0)$ для разных высот над фотосферой: $h = 0$ — сплошная линия, $h = 0.1R_\odot$ — пунктирная. Во всех случаях параметры $\delta = 23^\circ$, $P = 0^\circ$, $B = 0^\circ$.

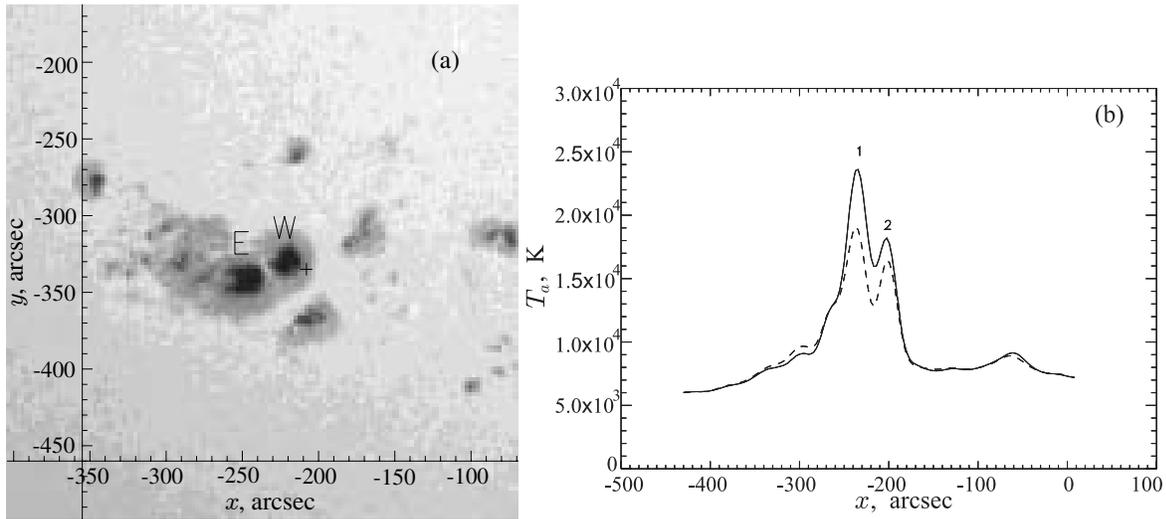


Рис. 5. а) Изображение головной части NOAA 11520 11.07.2012, полученное на SDO (AIA/4500 Å). Крестиком отмечено положение источника 2 согласно определенным в данной работе координатам; б) Радиосканы NOAA 11520, полученные на РАТАН-600 в $A_p = 0$ на частоте $f = 12.9$ GHz. Скан в R -поляризации показан сплошной линией, в L — пунктирной.

показывает, что результаты мало зависят от того, какая точка в окрестности пятен E и W выбрана для оценки скорости. После обеих коррекций (за смещение центра и за вращение) по формулам (2) были вычислены стандартные координаты источника 2 на момент наблюдений в нулевом азимуте (примерно 09 : 19 UT). Для определения координат использовались сканы на частоте 12.9 ГГц. Координаты определялись для всех возможных пар азимутов. Полное число пар равно 300, однако из-за того, что не на всех сканах удалось определить положение максимума 2 (в частности, из-за эффектов антенного сглаживания), число пар азимутов в R поляризации составило 190, а в L —

253. Вычисленные координаты источника 2 показаны на Рис. 7, слева — результаты, полученные по сканам правополяризованного излучения, справа — левополяризованного. На Рис. 7а–b показан полный набор полученных координат, Рис. 7с–d — координаты в области, ограниченной по x интервалом $[-200'', -180'']$, а по y — $[-400'', -300'']$. В эту область попало большинство координат — 126 точек в R поляризации и 176 точек в L , т.е. приблизительно 70% от использованных пар азимутов.

Хотя имеется большой разброс координат, но много координат находится в малой окрестности

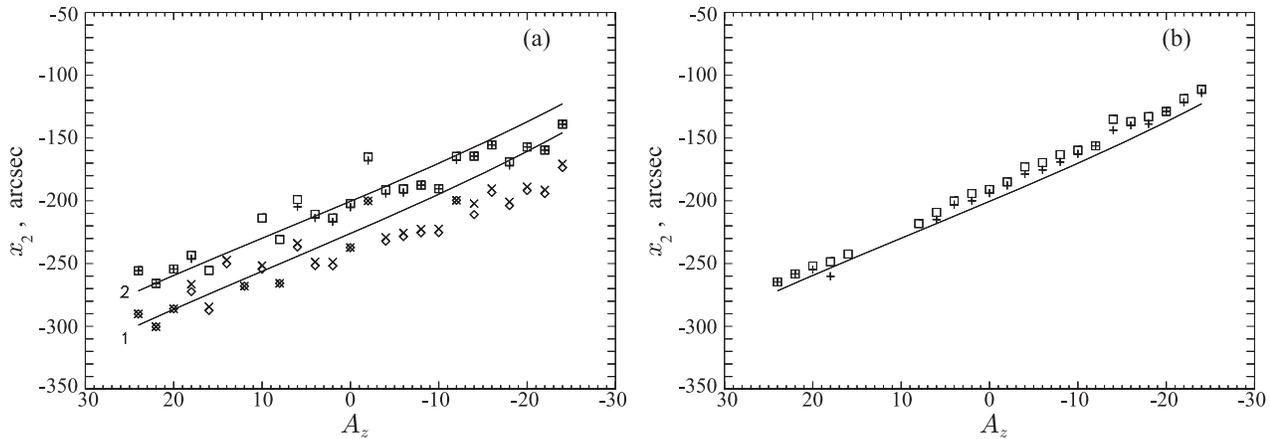


Рис. 6. а) Зависимость от азимута координаты x_2 для источников 1 и 2 и расчетные значения x_2 для пятен E(1) и W(2). б) Скорректированные за смещение центра координаты x_2 для источника 2 и расчетные x_2 для пятна W. Символы 'x' и '◇' соответствуют право- и левополяризованному излучению источника 1, а символы '+' и '□' — источника 2. Сплошными линиями 1 и 2 показаны смоделированные значения x_2 для центров пятен E и W соответственно.

одной точки. Это подтверждается гистограммами, которые показаны на Рис. 7e–f. Размер ячейки (интервала группировки) гистограмм равен $5'' \times 5''$. Максимум виден достаточно отчетливо, число точек попавших в максимальную ячейку, как минимум, в несколько раз превышает число точек в других ячейках и составляет 20–30% от общего числа. В то же время далеко отстоящие от максимума точки присутствуют в своих ячейках, как правило, в единственном числе. Все это дает основания выбрать координаты максимума гистограммы в качестве оценки координат источника 2. В R и L поляризациях координаты максимума гистограмм совпадают. Таким образом, на момент времени 09:19 UT стандартные координаты источника 2 $X \approx -192''$, $Y \approx -342''$, а в системе координат helioprojective-cartesian соответственно $-205''$ и $-335''$. Соответствующее этим координатам положение источника 2 показано на оптическом снимке Рис. 5 крестиком.

На Рис. 8 показаны наблюдаемые значения x_2 для источника 2 и модельные кривые. Сплошной линией показана модельная кривая, рассчитанная для полученных в данной работе координат, а штрих-пунктирной — для координат источника 2 из работы Abramov-Maximov et al. (2015). В первом случае имеется хорошее соответствие между модельной кривой и экспериментальными точками, тогда как кривая, полученная для координат из работы Abramov-Maximov et al. (2015), заметно отклоняется от них. В работе Abramov-Maximov et al. (2015) координаты были получены тем же методом, что и в данной работе, но в его ручном графическом варианте с использованием небольшого числа пар азимутов. Расхождение в оценке координат могло возникнуть из-за различия в способах коррекции

смещения центра скана или из-за недостаточного количества пар азимутов, использованных в работе Abramov-Maximov et al. (2015).

5. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе описан аналитический вариант метода, который долгое время был основным способом получения координат солнечных радиоисточников по многоазимутальным наблюдениям. С его помощью определены координаты радиоисточника в активной области NOAA 11520. Полученные координаты хорошо согласуются с наблюдательными данными. Поскольку в работе рассчитываются модели наблюдений при различных значениях координат, то несложно определить координаты и другим способом, минимизируя сумму квадратов невязок (МНК). При одинаковом наборе входных данных (x_2 , исправленных за смещение центра), координаты, полученные обоими способами совпадают с точностью $\pm 10''$. Однако следует обратить внимание на то, что для получения оценки координат пришлось корректировать ошибки исходных данных. Кроме того, несмотря на уменьшение ошибок, разброс единичных определений координат оказался довольно большим — среднеквадратичное расстояние точек от точки максимума гистограммы составило примерно $100''$.

Ошибки координатной привязки солнечных сканов при их получении в режиме ЮП велики, и определить координаты без предварительной коррекции данных не удастся. На это указывалось в ряде работ и ранее, например, в работе Bogod and Yasnov (2009; 2013). В работе Bogod and Yasnov (2009) для определения координат применялся метод наименьших квадратов. Однако без коррекции данных удалось определить только разность

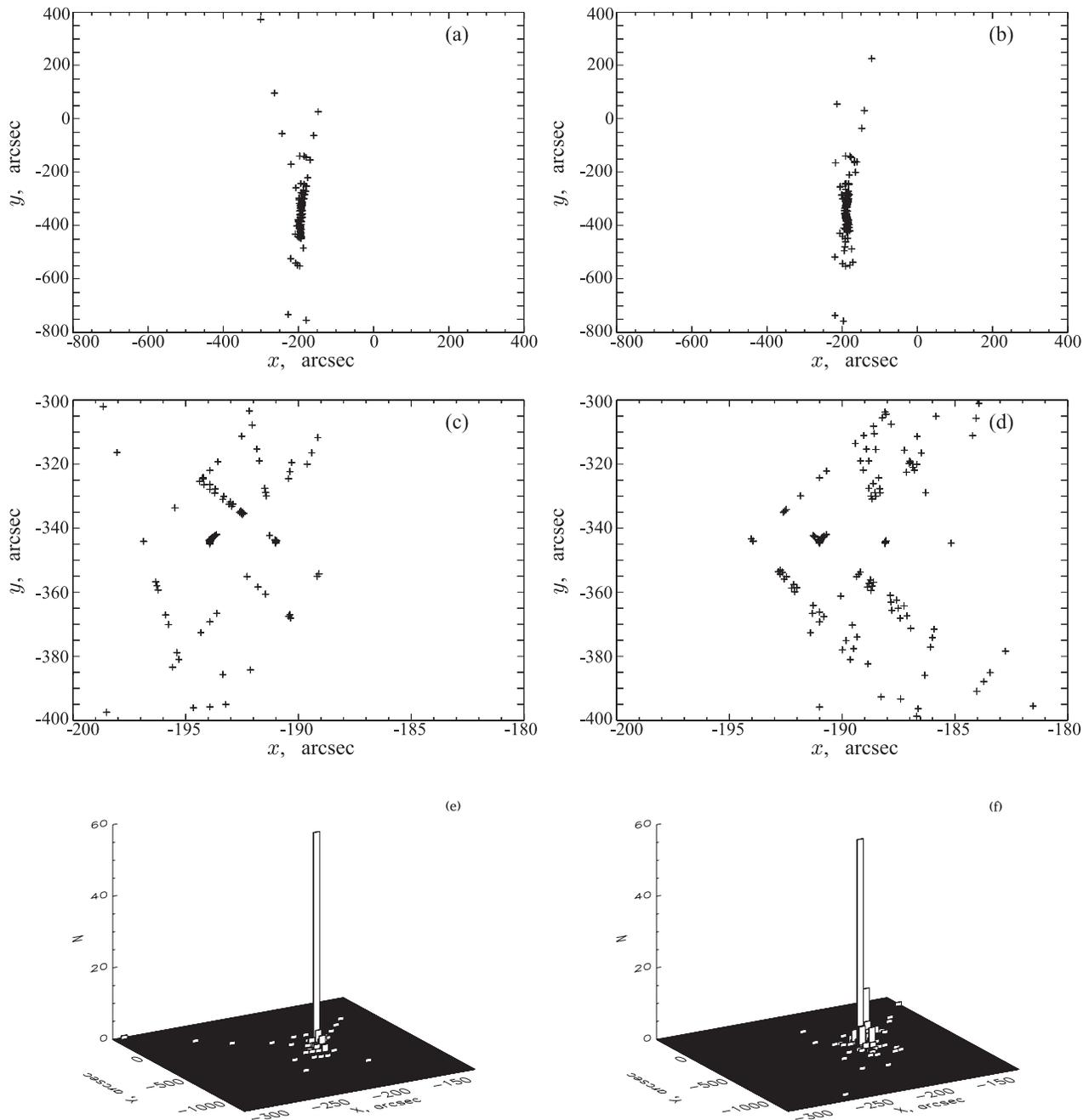


Рис. 7. Результаты определения координат источника 2: а–б) область картинной плоскости $20' \times 20'$, которая охватывает оценки координат, полученные по всем парам азимутов для которых удалось определить положение максимума 2. На с–d более подробно показана центральная область $20'' \times 100''$. е–f) — гистограммы распределения координат. На левых рисунках координаты, определенные по сканам R поляризации, на правых — L .

между координатами источников на разных длинах волн, а сами координаты получены не были. Таким образом процедура коррекции важна, однако как процедура, примененная в нашей работе, так и способы коррекции, описанные в работе Bogod et al. (2004), Garaimov (1997), Shatilov (1987), опираются на предположения, которые не всегда

выполняются. Поэтому необходимо дальнейшее исследование как самих ошибок координатной привязки, так и способов их уменьшения.

Основными ошибками, смещающими центр скана, являются ошибки установки антенны, которые приводят к отклонению центра ДН от его расчетного положения. Отклонение центра ДН

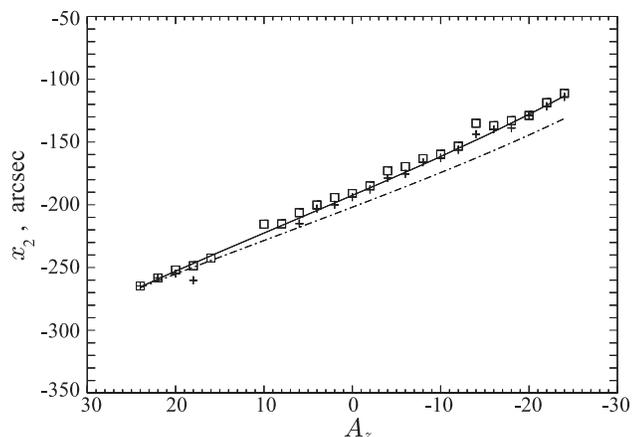


Рис. 8. Скорректированные за смещение центра скана наблюдаемые координаты x_2 для источника 2 и расчетные значения x_2 для точки с координатами, полученными для в данной работе (сплошная линия), и с координатами из работы Abramov-Maximov et al. (2015) (штрих-пунктирная линия).

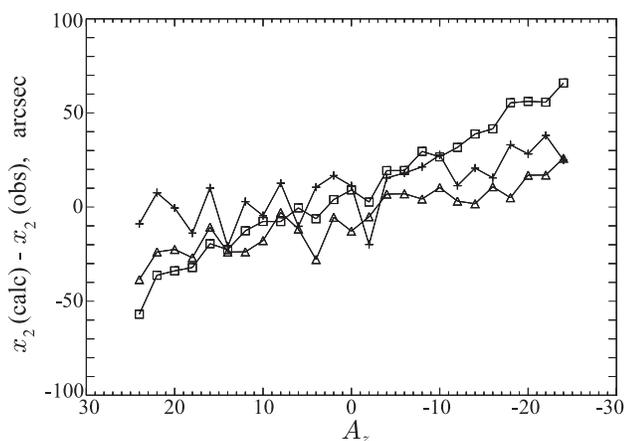


Рис. 9. Отклонение центра Солнца на скане от расчетного значения в зависимости от азимута для наблюдений 11 июля 2012 (+), 19 декабря 2014 (□) и 13 апреля 2019 (△).

отчетливо проявляется в текущих наблюдениях Солнца не только в смещении центра скана, но также и в том, что в дальних азимутах форма сканов становится несимметричной, что объясняется, скорее всего, смещением ДН по склонению.

Приведем примеры смещения центра скана. Напомним, что в нашей работе оно оценивалось как разница между расчетным (calc) и наблюдаемым (obs) значениями x_2 для пятенных радиоисточников, выбранных опорными. Для расчетов брались координаты пятен, определенные по оптическим снимкам SDO. На Рис. 9 показано смещение для трех существенно различных дат. Видно, что смещения в разные дни ведут себя похожим образом,

во всех случаях виден линейный тренд. Это позволяет предположить, что имеется систематическая составляющая смещения центра ДН, которая растет с удалением азимута от меридиана и имеет разный знак для положительных и отрицательных азимутов. Следует также обратить внимание на то, что величина смещения даже в близких к меридиану азимутах достигает десятков угловых секунд. Это значительно больше, чем случайная координатная ошибка одного наблюдения в стандартном режиме работы антенны одним сектором, оцененная в работе Mingaliev and Chernenkov (1991) и составляющая приблизительно $4''$.

Причины возникновения ошибок в определении координат максимумов источников на сканах не сводятся только к ошибкам установки антенны и смещению центра скана. Например, это могут быть ошибки привязки сканов по времени или неточное знание величины интервала между отсчетами. На положение максимума источника на скане влияет также антенное сглаживание, которое смещает близко расположенные источники относительно их истинных положений. Кроме этого, возможно изменение угла наклона диаграммы r по сравнению с расчетным, которое может быть вызвано несимметричным относительно оси системы распределением поля на антенне (Petrunin et al. 1964). Некоторое изменение угла r может возникнуть также из-за неверного положения ДН по склонению или ошибки азимута облучателя. Следует обратить внимание на ошибки, связанные с точностью вычислений положения максимума, которые зависят от величины интервала между отсчетами.

Большой разброс координат, оставшийся после коррекции центра, которая применялась для устранения основной части ошибок определения положения максимума, по-видимому, говорит о чувствительности рассмотренного в нашей работе метода к точности входных данных и необходимости применения методов решения, устойчивых к помехам. Для выбора наиболее подходящего способа оценки следует продолжить исследования способов определения координат по многоазимутальным наблюдениям.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа В.Е.Абрамова-Максимова и В.Н.Боровик выполнена в рамках государственного задания ГАО РАН (тема “Энерговыделение” 00412019-0019)

Наблюдения на телескопе РАТАН-600 выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. E. Abramov-Maximov, V. N. Borovik, L. V. Opeikina, and A. G. Tlatov, *Solar Physics* **290** (1), 53 (2015).
2. S. B. Akhmedov, V. N. Borovik, G. B. Gelfreikh, et al., *Astrophys. J.* **301**, 460 (1986).
3. S. B. Akhmedov, G. B. Gelfreikh, V. M. Bogod, and A. N. Korzhavin, *Solar Physics* **79** (1), 41 (1982).
4. C. W. Allen, *Astrophysical quantities* (Athlone Press, London, 1973).
5. R. H. T. Bates and M. J. McDonnell, *Image restoration and reconstruction* (Clarendon Press, Oxford, 1989).
6. S. N. Blazhko, *Course of practical astronomy* (Nauka, Moscow, 1979).
7. V. M. Bogod, *Otchet SAO AN SSSR No. 112* (1983).
8. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, *Astrophysical Bulletin* **66** (2), 205 (2011).
9. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astrophysical Bulletin* **64** (4), 372 (2009).
10. V. M. Bogod and L. V. Yasnov, *Astrophysical Bulletin* **68** (3), 347 (2013).
11. V. M. Bogod, G. N. Zhekanis, M. G. Mingaliev, and S. K. Tokhchukova, *Radiophysics and Quantum Electronics* **47** (4), 227 (2004).
12. V. I. Garaimov, Preprint SAO RAS No. **127T** (1997).
13. O. A. Golubchina, V. N. Ikhsanova, V. M. Bogod, and G. S. Golubchin, *Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk SSSR* **1981**, 108 (1981).
14. O. A. Golubchina, G. V. Zhekanis, V. M. Bogod, and S. X. Tokhchukova, in *Solar Variability: From Core to Outer Frontiers*, Proc. of 10th European Solar Physics Meeting, 9 - 14 September 2002, Prague, Czech Republic, ed. by A. Wilson, **2** (2002), pp. 939–941.
15. V. N. Ikhsanova, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove* **23** (3), 31 (1964).
16. P. G. Kulikovskij, *Spravochnik ljubitelja astronomii*, ed. by V. G. Surdin (Editorial URSS, Moscow, 2002).
17. B. S. Minchenko, *Radiophysics and Quantum Electronics* **26** (11), 1060 (1983).
18. B. S. Minchenko, *Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **21**, 91 (1986).
19. M. G. Mingaliev and V. N. Chernenkov, *Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **31**, 153 (1991).
20. A. Nindos, C. E. Alissandrakis, G. B. Gelfreikh, et al., *Solar Physics* **165** (1), 41 (1996).
21. I. N. Pariiskii and O. N. Shivris, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove* **188**, 13 (1972).
22. V. I. Petrunkin, N. A. Esepkina, G. V. Kuznetsova, and G. B. Kuznetsov, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove* **23** (3), 160 (1964).
23. V. A. Shatilov, *Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **25**, 168 (1987).
24. O. N. Shivris, *Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **12**, 134 (1980).
25. W. T. Thompson, *Astron. and Astrophys.* **449** (2), 791 (2006).
26. S. K. Tokhchukova, *Astrophysical Bulletin* **66** (3), 379 (2011).

Determination of the Coordinates of Radio Sources on the Sun from RATAN-600 Observations in Multi-azimuth Mode

L. V. Opeikina, V. E. Abramov-Maximov, V. N. Borovik, and V. N. Chernenkov

We provide an analytical description of the method for the determination of the coordinates of solar radio sources from multi-azimuth observations on RATAN-600. We analyze models of the offset of the object across the scan depending as a function of azimuth taking into account solar rotation and suggest a method for estimating the rate of offset due to rotation. We demonstrate the results of the application of the method using the determination of the coordinates of a radio source in the active region NOAA 11520 as example. After eliminating gross scan referencing errors we obtained the coordinates, which agree well with observational data. We discuss the scan coordinate reference errors.

Keywords: *Sun: radio radiation—methods: data analysis*