

УДК 520.272.2

РАСЧЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАЗМЕРА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ РАТАН-600 В РЕЖИМЕ «ЮЖНЫЙ СЕКТОР С ПЛОСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ» С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ

© 2014 С. Х. Тохчукова^{1*}, А. Н. Коржавин¹,
В. М. Богод^{1,2}, Е. А. Курочкин¹, А. В. Шендрик^{1,2}

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН,
Санкт-Петербург, 196140 Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

Поступила в редакцию 13 февраля 2014 года; принята в печать 20 мая 2014 года

Представлены результаты расчета спектров горизонтального размера диаграммы направленности РАТАН-600 в режиме наблюдений «Южный сектор с плоским отражателем» в приближении геометрической оптики с учетом диаграмм направленности первичных облучателей различного типа, используемых при наблюдениях на Солнечном приемном комплексе, в диапазоне частот 3–18 ГГц. В частности, показано, что при использовании широкодиапазонных облучателей спирального и синусного типов горизонтальная диаграмма направленности антенны сужается с длиной волны в низкочастотной области спектра. Проведен расчет спектров размеров двух компактных локальных источников на Солнце, который показал необходимость учета полученных результатов при определении параметров локальных источников.

Ключевые слова: *телескопы — радиоконтинуум*

ВВЕДЕНИЕ

Регулярные наблюдения Солнца на РАТАН-600 на Южном секторе с плоским отражателем (Ю + П) проводятся с 1974 г. Работа радиотелескопа в этом режиме описана в [1]. Южный сектор кругового отражателя состоит из 225 элементов (№ 38–262) размером 2×11.4 м, расположенных по дуге окружности радиусом 288 м (рис. 1). Угловой размер одного элемента из центра антенны (обозначен буквой О на рис. 1) равен $0^{\circ}4$. Плоский отражатель состоит из 124 элементов размером 3.1×8.5 м каждый, общей протяженностью 400 м, и отстоит от центра радиотелескопа на 104 м к югу. В центре плоского отражателя отсутствуют три элемента, образуя щель шириной 9.3 м. Это технологический пропуск, служащий для перемещения кабин со вторичными отражателями по радиальным рельсам между центром антенны и Южным сектором. Вторичный отражатель № 3 с фокусным расстоянием 2.5 м, в фокусе которого находится первичный облучатель, представляет собой несимметричный параболический цилиндр с горизонтальной образующей размером 5.5×8 м и

перемещается по круговым рельсам, отстоящим от главного отражателя на 130 м. В режиме Ю + П круговой отражатель образует параболический цилиндр с вертикальной образующей и всегда направлен на горизонт. На высоту источника антенна устанавливается поворотом плоского отражателя. Формируемая диаграмма направленности (ДН) является ножевой, с вертикальным размером примерно в 60 раз большим, чем горизонтальный. Здесь и далее под размером ДН будем понимать ширину центрального горизонтального сечения ДН на уровне половины мощности (-3 дБ) — Half Power Beam Width (HPBW). При отсутствии aberrаций форма ДН близка к гауссиане,

определяемой как $f(x) = \exp \frac{-4 \ln(2) x^2}{\text{HPBW}^2}$ [2]. Для оценки полного угла облучения используется размер ДН на уровне -10 дБ (для гауссианы $-10 \text{ dB BW} = \log_2(10) \text{ HPBW} \approx 1.823 \text{ HPBW}$). В случае если рассматривается ДН по полю, будем использовать обозначения FWHM (Full Width at Half Maximum) и -10 dB FW . Для гауссианы

$\text{FWHM} = \sqrt{\frac{1}{2}} \text{HPBW} \approx 0.707 \text{HPBW}$. В первом

*E-mail: stokh@mail.ru

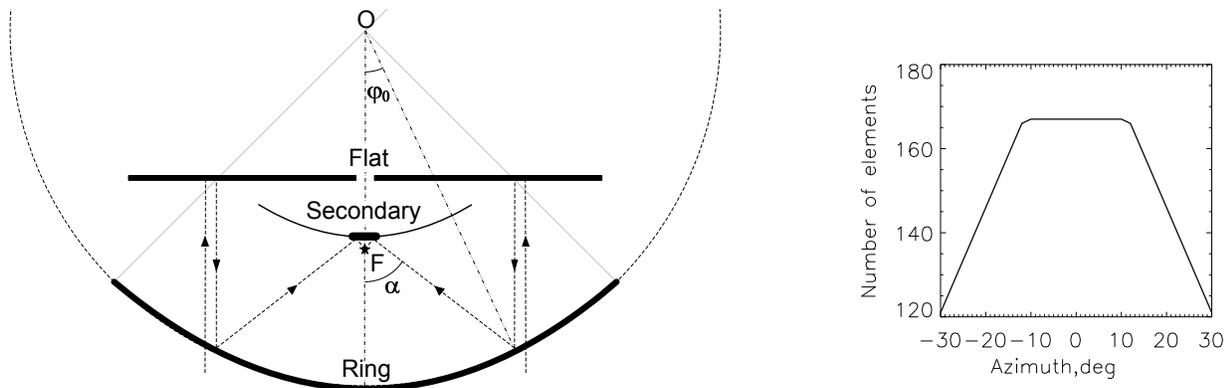


Рис. 1. Слева: схема работы РАТАН-600 в режиме Ю + П. Отражательные элементы (круговой, плоский и вторичный отражатели) изображены жирными черными линиями. Фокус трехзеркальной перископической системы обозначен звездочкой и буквой F. α — угловой полураскрыв рабочего сектора из фокуса, φ_0 — угловой полураскрыв из центра телескопа. Зависимость $\alpha(\varphi_0)$ рассмотрена в разделе 2. Справа: количество элементов в установке кругового отражателя при многоазимутальных наблюдениях.

приближении горизонтальный размер ДН Ю + П определяется длиной хорды дуги рабочего сектора, а вертикальный размер — высотой вторичного облучателя (5.5 м):

$$\begin{aligned} \text{HPBW}_h (\text{arcsec}) &= 8.5 \times \lambda \text{ см}, \\ \text{HPBW}_v (\text{arcmin}) &= 7.5 \times \lambda \text{ см}, \end{aligned} \quad (1)$$

где HPBW_h — горизонтальный размер диаграммы направленности антенны (ДНА), HPBW_v — ее вертикальный размер.

При обработке результатов наблюдений Солнца на Ю + П обычно предполагается, что диаграмма направленности постоянна, не считая влияния ошибок установки антенны. В данной работе показано, что в разное время ДНА в наблюдениях Солнца различались как из-за установок с разным количеством элементов кругового отражателя N_{el} (например, рис. 1 справа), так и в связи с использованием различных типов облучателей. Методика определения параметров локальных источников такова [2], что небольшие изменения размера ДНА оказывают существенное влияние на расчетный спектр размера источника и, как следствие, на спектр его яркостной температуры (см. раздел 5). Поэтому при определении размеров источников следует использовать размер ДН, сформированной в данном конкретном наблюдении. Этот размер зависит прежде всего от количества элементов в установке N_{el} (или пропорционального ему значения углового полураскрыва главного отражателя из центра телескопа $\varphi_0 = \frac{N_{el} \times 0.4}{2}$), см. рис. 1 слева. Для наблюдений Солнца на Ю + П изначально устанавливалось пять групп элементов

($N_{el} = 5 \times 25 = 125$, $\varphi_0 = 25^\circ$), для которых возможно выполнить автоколлимационную юстировку. С декабря 1998 г. с введением в эксплуатацию новой системы управления антенной [3] в установках задействовано максимально возможное количество элементов $N_{el} = 167$ ($\varphi_0 = 33.4^\circ$). Это меньше общего количества элементов в секторе (225 , $\varphi_0 = 45^\circ$), так как ограничение перемещения элементов по радиусу не позволяет устанавливать крайние элементы сектора по параболе на высоту горизонта. С 1999 г. после введения в регулярное пользование режима многоазимутальных наблюдений [4] применялись установки с различным количеством элементов, обычно 109, 125 и 167. В частности, установки с сокращенным количеством элементов (109) использовались в наблюдениях в азимутах через 1° , т.к. из-за низкой скорости перемещения элементов не хватало времени для установки крайних элементов параболы на следующий азимут. Позже сценарий наблюдений был оптимизирован для использования всей доступной части Южного сектора. Но и при более разреженных наблюдениях в азимутах, начиная с азимута $\pm 12^\circ$, количество элементов в установках каждые два градуса сокращается на пять (см. рис. 1 справа), в частности из-за того, что не задействованы элементы Восточного и Западного секторов. Результаты расчета HPBW в зависимости от количества элементов в установке N_{el} приводятся в разделе 2. Кроме сокращения количества элементов в установке, на параметры антенны в азимутах влияет, например, затенение плоского отражателя вторичным отражателем, положение которого в азимутах расходится с технологическим пропуском в центре плоского отражателя.

С целью развития спектрального приемного

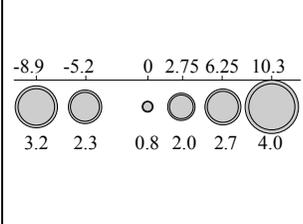
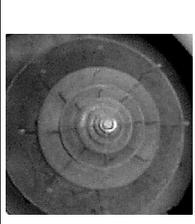
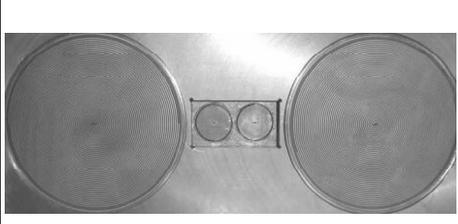
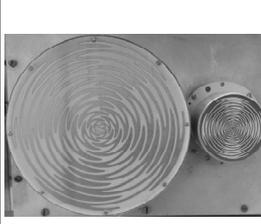
			
<p>(a)</p> <p>Облучатели волноводного типа (схема)</p> <p>1974–1991 гг.</p>	<p>(b)</p> <p>Облучатель на резонаторах бегущей волны</p> <p>1991–2005 гг.</p>	<p>(c)</p> <p>Облучатели на плоских двухзаходных спиральных</p> <p>сентябрь 2005 г.–28 сентября 2011 г.</p>	<p>(d)</p> <p>Синусные облучатели</p> <p>29 сентября 2011 г.–н. в.</p>

Рис. 2. Внешний вид первичных облучателей, используемых в разные периоды для наблюдений Солнца на Ю+П РАТАН-600.

комплекса для наблюдений Солнца на РАТАН-600 производится поиск и применение новых сверхширокодиапазонных входных облучателей с возможностью подробного анализа спектра с одновременной регистрацией правой и левой круговой поляризации с единым фазовым центром (см. рис. 2). В этой связи целью данной работы является анализ спектральных характеристик диаграммы направленности при применении первичных облучателей различного типа.

В наблюдениях на солнечном комплексе в период 1974–1991 гг. на коротких сантиметровых волнах (0.8–4.0 см) использовались волноводные облучатели (открытый конец круглого волновода с одним скалярным кольцом на $1/4$ длины волны), угол облучения которых был согласован с углом раскрытия кругового отражателя антенны и не зависел от длины волны ($\text{HPBW} = 55^\circ$, $-10\text{dBVW} = 103^\circ$, см. подробнее в разделе 1). Схема расположения рупоров приведена на рис. 2а. Сверху указаны величины поперечных смещений из фокуса, снизу — рабочие длины волн в см.

В 1991–2005 гг. был установлен облучатель конструкции В. Н. Дикого на резонаторах бегущей волны [5] (на более длинных волнах — 8–31 см — этот тип облучателей был введен в наблюдения с 1982 г.). Угол его облучения был несколько больше ($\text{HPBW} = 65^\circ$, $-10\text{dBVW} = 120^\circ$) и также не зависел от длины волны (рис. 2б).

В 2005 г. солнечный приемный комплекс был полностью обновлен [6–8], в том числе были заменены входные облучатели: установлены широкодиапазонные облучатели на плоских двухзаходных спиральных с отдельными фазовыми центрами для правой и левой круговых поляризаций (рис. 2с),

которые позволили повысить спектральное разрешение с 5% до 1%. Спиральные облучатели диапазона 3–18 ГГц, характеристики которых рассматриваются в данной работе, были изготовлены СП «Миррад»¹ по образцу антенн производства Randtron Antenna Systems диапазона 2–18 ГГц.² Соответствие характеристик изготовленных облучателей промышленным образцам было установлено измерениями на двух частотах вблизи 12 ГГц и 14 ГГц. Поскольку возможны некоторые отличия диаграммы реально используемого первичного облучателя от измеренных образцов, мы провели расчеты еще для одной модели спиральной антенны, работающей в диапазоне 6–18 ГГц,³ чтобы дать представление о характерных спектрах параметров облучателей данного типа. Спиральные облучатели позиционируются как имеющие частотно-независимые характеристики, но, как показывают наши расчеты, влияние вариаций HPBW облучателя от 65° до 100° на определяемые размеры источников является существенным и должно быть учтено при обработке наблюдений (см. раздел 3).

29 сентября 2011 г. в фокусе вторичного отражателя третьего облучателя были установлены сверхширокодиапазонные «извилистые» облучатели (sinuous antenna) фирмы Q-par Angus Ltd.^{4,5}

¹<http://www.mirrad.com.ua>

²http://www2.1-3com.com/randtron/img/53411_2in_Spiral.pdf

³<http://www.spbf.sao.ru/prognoz/papers/53410Spiral.pdf>

⁴<http://www.q-par.com/products/sinuous-antennas/2-18-ghz-dual-polarized-sinuous-antennas>

⁵<http://www.q-par.com/products/sinuous-antennas/0-7-4-ghz-dual-circularly-polarised-sinuous-antennas>

(рис. 2d). Так же, как и спиральные облучатели, они обеспечивают высокое спектральное разрешение в широком диапазоне и при этом имеют единый фазовый центр для приема левой и правой круговой поляризации. Согласно паспортным данным используемых синусных облучателей, НРВW варьируется в пределах от 50° до 85° в зависимости от частоты. В настоящее время в солнечном комплексе используются две антенны производства Q-par Angus Ltd. — модель QSPDCP0.7-4S3 в диапазоне 0.74–3 ГГц и QSPDCP2-18SRA4 в диапазоне 3–18.2 ГГц. Первоначально для минимизации aberrаций во всем диапазоне в фокус был установлен стык между облучателями сантиметрового и дециметрового диапазонов (см. рис. 2d). Позднее, 5 октября 2011 г., для устранения бокового лепестка на коротких волнах в фокус был помещен центр облучателя сантиметрового диапазона. Поперечное смещение из фокуса для дециметрового диапазона при этом равно расстоянию между центрами облучателей (11.2 см), что примерно равно самой короткой длине волны (10 см) и находится в пределах горизонтальной безабберационной зоны $\pm 2.5 \lambda$ [9]. Расчеты ДНА Ю + П с этими облучателями также показывают значительное отклонение спектров полуширины от наблюдений с волноводными облучателями, особенно в низкочастотной части рассматриваемого диапазона (см. раздел 4).

Рабочий диапазон длин волн радиотелескопа РАТАН-600 простирается от 0.6 ГГц до 38 ГГц. На солнечном приемном комплексе в настоящее время ведутся наблюдения в диапазоне 0.75–18.2 ГГц. Т.к. разрешающая способность телескопа на низких частотах $f < 3$ ГГц заметно падает, расчет НРВW Ю + П для системы «первичный облучатель—вторичный отражатель—круговой отражатель—плоский отражатель» и определение размеров компактных локальных источников в данной работе выполнены в диапазоне частот 3–18 ГГц.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Для расчета ДН в режиме Ю + П РАТАН-600 был использован комплекс программ, в которых реализована методика, частично описанная в работах [10, 11]. Расчет выполняется апертурным методом в соответствии с общей электродинамической теорией антенн переменного профиля, приведенной, например, в [12]. Вычисления фазы при выносах облучателя из фокуса делаются по формулам, полученным в [13], конструкция радиотелескопа для кругового отражателя учитывается по формулам [14], особенности конструкции вторичного отражателя учитываются согласно [15]. Распределение поля в кольцеобразной апертуре кругового

отражателя рассчитывается в рамках геометрической оптики с учетом формы диаграммы первичного облучателя, которая считается симметричной и совпадающей в Е- и Н-плоскостях. Для упрощения расчета интеграла Фурье двумерное кольцеобразное распределение поля в апертуре сводится к одномерному интегрированию по радиусу, т.е. апертура антенны считается бесконечно тонким кольцом. Описанная методика была реализована в виде программ на Fortran [10, 11].

Соответствие расчетных горизонтальных сечений ДН с экспериментальными данными как для Северного сектора, так и для Ю + П было установлено по наблюдениям точечных источников. Например, в работе [16] при наблюдениях ярких точечных источников ЗС 84 и ЗС 273 было установлено соответствие расчетных и наблюдаемых кривых в области боковых лепестков с точностью до десятых долей процента. В работе [17] при разработке системы калибровочных источников для высокочувствительных широкополосных радиометров РАТАН-600 отмечено высокое соответствие наблюдаемых и расчетных абберационных эффектов в широком интервале выносов из фокуса первичных облучателей. Методика в дальнейшем была развита с учетом дифракционных и других эффектов (см. [9, 18] и ссылки в них). Впоследствии комплекс программ был перенесен на язык Си и платформу Linux и включен в систему обработки данных FADPS⁶ [19]. Для удобства расчетов мы создали программу-оболочку, которая позволяет выполнить расчет ДНА на многих волнах в автоматическом режиме, а также пользовательский веб-интерфейс, работающий в одноволновом режиме. Последний представлен для общего пользования на веб-сайте информационной системы для наблюдений Солнца «Прогноз»⁷ [20] (рис. 3). Все приведенные в данной работе расчетные спектры ДНА можно получить на этой странице в цифровом формате.

ДН первичного облучателя (ДНО), которая является одним из входных параметров счета, может быть задана либо половиной кривой, представляющей ДН по полю, либо значением полуширины ДН по мощности, по которой ДН по полю восстанавливается как квадратный корень из гауссианы заданной полуширины. На рис. 3 слева приведена расчетная горизонтальная ДНА для помещенного в верхней части рисунка набора параметров и изображенной в правом окне ДН волноводного облучателя, которая представлена по полю и по мощности. ДНО по полю «защита» в программе счета, ее размер составляет $\text{FWHM} = 77^\circ$

⁶http://sed.sao.ru/~vo/fadps_r.html

⁷http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat_beam.ion

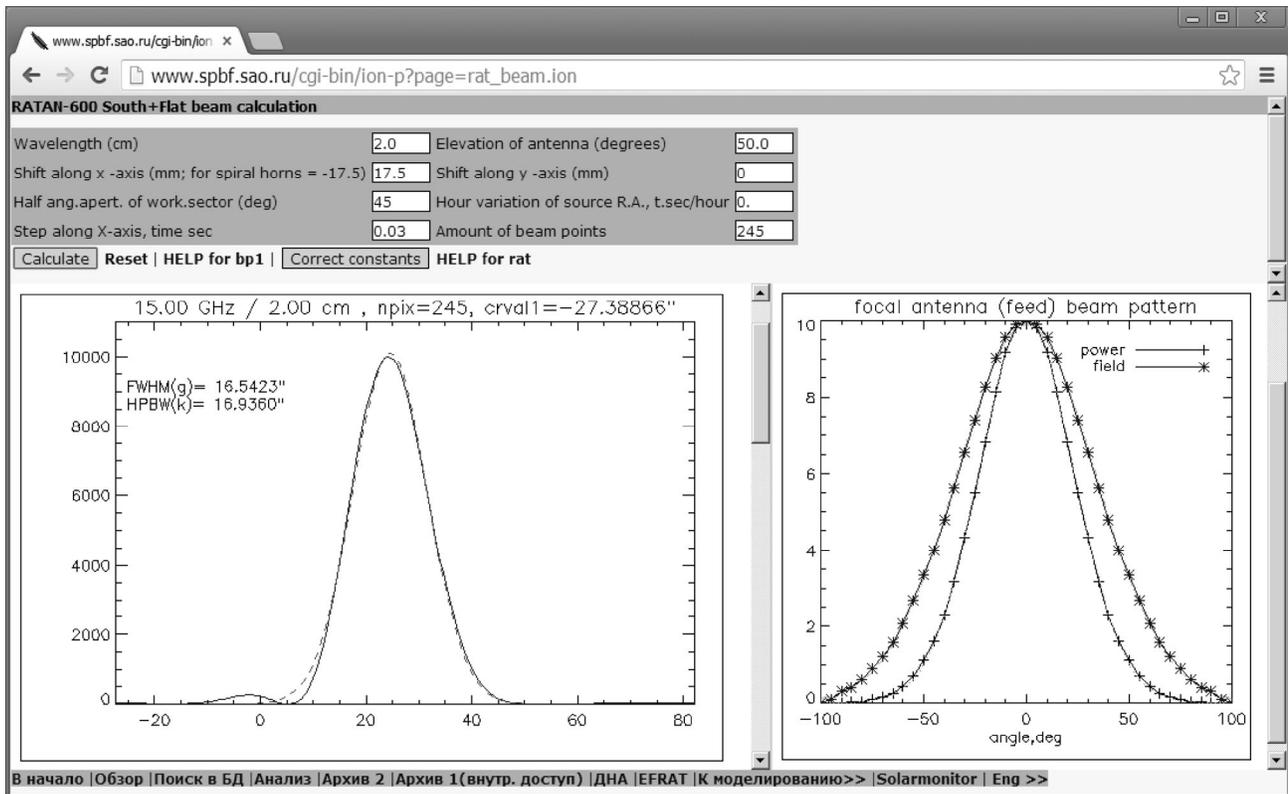


Рис. 3. Веб-интерфейс для расчета одномерной горизонтальной ДН РАТАН-600 в режиме Ю + П. Слева: расчетная ДНА на волне 2 см при $\varphi_0 = 33^\circ 4'$, поперечном смещении облучателя из фокуса $dx = 17.5$ мм и высоте источника $h = 50^\circ$. Справа: ДН волноводного облучателя по мощности (HPBW = 55°) и по полю (FWHM = 77°).

(-10 dBFW = 147°). Так называемые «константы телескопа», определяющие его геометрические и конструктивные особенности, в том числе ДН облучателя, могут быть заданы отличными от значений по умолчанию нажатием на кнопку «Correct constants» (рис. 3).

2. РАЗМЕР ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПРИ ЧАСТОТНО-НЕЗАВИСИМОЙ ДИАГРАММЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ОБЛУЧАТЕЛЯ

На рис. 4 слева сплошной линией показана зависимость углового полураскрыва α рабочего сектора из фокуса от углового полураскрыва φ_0 из центра телескопа (и пропорционального ему числа элементов в установке N_{el} — отложено по верхней оси), определяемая для Ю + П соотношением [10]:

$$\sin \alpha = \frac{2 \sin \varphi_0}{1 + \sin^2 \varphi_0}.$$

Как видно из рис. 4 (слева), для рабочего сектора Ю + П ($N_{el} = 167$) угловой полураскрыв из фокуса α составляет около 58° . Для облучения этого раскрыва диаграмма направленности первичного

облучателя должна иметь соответствующий размер на уровне -10 дБ: 2α ($\varphi_0 = 33^\circ 4'$) = 115° . Положение, размер и фокусное расстояние вторичного отражателя также рассчитаны на максимальный угол облучения $2\alpha = 2 \arctan\left(\frac{4}{2.5}\right) = 115^\circ$.

Примерно в этих пределах находится размер -10 dBFW ДН волноводного облучателя. Однако выбор оптимального угла облучения (размера ДН) не столь однозначен. При большем размере ДНО энергия будет «переливаться» за края установленного по параболе Южного сектора (переоблучение антенны), что уменьшает чувствительность системы. Но увеличение размера ДНО ведет также к сужению ДНА, т.е. увеличению разрешающей способности телескопа. При наблюдениях Солнца разрешающая способность важнее, чем чувствительность, а при наблюдениях точечных радиосточников — наоборот. Но ясно, что какой бы ни был размер ДН облучателя, для расчета ДНА его нужно знать с хорошей точностью.

Как было отмечено во Введении, для наблюдений Солнца на РАТАН-600 в режиме Ю + П используются установки с различным числом элементов N_{el} . На рис. 4 слева штриховой линией

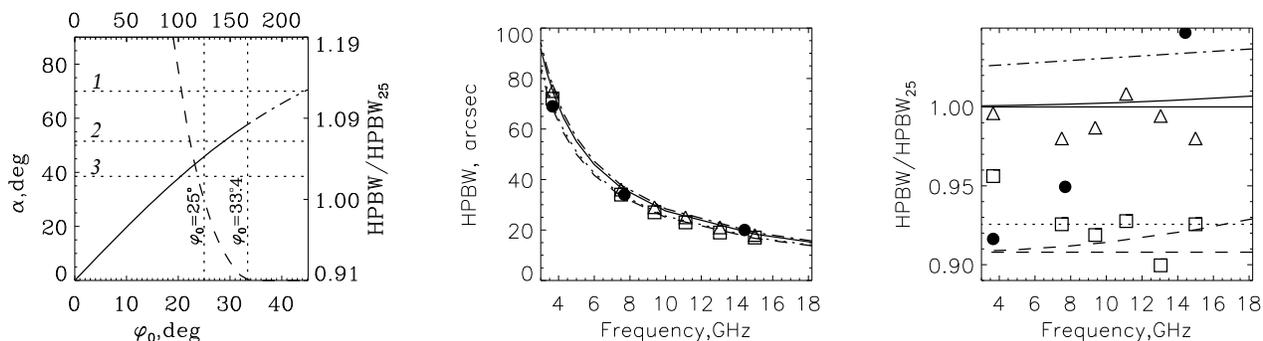


Рис. 4. Слева: сплошная линия — зависимость углового полураскрыва α рабочего сектора из фокуса от углового полураскрыва φ_0 из центра телескопа (см. рис. 1) для Ю + П; горизонтальные пунктирные линии — половинные угловые размеры ДН волноводного облучателя (1 — $\frac{FWHM}{2}$, 2 — $\frac{-10\text{ dBFW}}{2}$, 3 — $\frac{-10\text{ dBVW}}{2}$); вертикальные пунктирные линии — φ_0 для установок с $N_{el} = 125$ и $N_{el} = 167$; штриховая линия — зависимость $HPBW(\varphi_0)/HPBW_{25}$ (для нее — вертикальная ось справа). В середине: зависимость размера ДНА от частоты. Сплошная линия — $HPBW_{25}(\varphi_0 = 25^\circ, dx = 0)$, штриховая — $HPBW_{33.4}(\varphi_0 = 33.4^\circ, dx = 0)$, штрихпунктирная — $HPBW(2)$, пунктирная — $HPBW_h(1)$. Символы: треугольники — размеры из работ [2, 21], квадраты — из [22], черные кружки — из [23]. Справа: то же, что в середине, отнесенное к $HPBW_{25}$. Растущие к высоким частотам сплошная и штриховая линии представляют $HPBW_{25}$ и $HPBW_{33.4}$ при смещении из фокуса $dx = 17.5$ мм, горизонтальные — без смещения.

показана расчетная зависимость относительного размера ДНА $HPBW/HPBW(\varphi_0 = 25^\circ)$ от количества элементов в установке N_{el} (или от φ_0) на частоте $f = 15$ ГГц. Согласно этой кривой, при увеличении количества элементов в установке со 125 до 167 ДНА сужается примерно на 9%. При количестве элементов в установке $N_{el} = 109$ ДНА приблизительно на 17% шире, чем при $N_{el} = 167$. Также можно заметить, что после $N_{el} = 125$ наклон кривой уменьшается, т.е. вклад крайних элементов в апертуру меньше, чем центральных пяти групп.

На рис. 4 (в середине и справа) сравниваются расчетные (с различными значениями входных параметров φ_0 и dx) и взятые из литературы (экспериментально измеренные радиоастрономическим методом в разные годы) значения $HPBW$. На правом рисунке приведено отношение всех размеров к $HPBW_{25}$. Штрихпунктирной линией нарисован спектр значений, который в системе регистрации солнечного приемного комплекса заносится в заголовки FITS файла наблюдения [24]. Это линейное приближение:

$$HPBW(\text{arcsec}) = 0.2 + 9.4 \lambda \text{ см.} \quad (2)$$

Оно отличается от $HPBW_{25}$ (сплошная линия) не более чем на 3%. Размеры ДНА, которые были использованы при обработке наблюдений до 1998 г. [21] (рис. 4) также достаточно близки к $HPBW_{25}$. Наиболее сильно отклоняется от $HPBW_{25}$ размер из работы [22] (квадраты). Этот размер близок к $HPBW_{33.4}$. Возможно, что серия наблюдений в 1996 г. в азимутах проводилась с максимальным числом элементов в установке. Что

касается расчетных размеров ДНА, то, как видно из сравнения сплошной и пунктирной кривых, сужение ДНА вследствие увеличения φ_0 с 25° до 33.4° составляет около 9%. Уширение главного лепестка, вызванное смещением облучателей из фокуса на $dx = 17.5$ мм, составляет менее 0.5% при использовании 125 элементов (верхняя сплошная линия на рис. 4 справа) и до 2% при максимальном числе элементов 167 (верхняя штриховая линия там же), что находится в пределах ошибки измерения при определении размеров локальных источников на этих частотах.

Таким образом, из рассмотренных факторов, влияющих на горизонтальный размер ДНА, наиболее значимым является увеличение количества элементов в установке со 125 до 167. Вызванное этим обстоятельством сужение ДНА необходимо учитывать при обработке всех наблюдений после 1998 г. Несмотря на то что относительное изменение размеров ДНА одинаково во всем диапазоне, на коротких волнах абсолютная величина этих изменений составляет всего несколько секунд дуги и может оказаться в пределах ошибки измерения, к тому же расчетное сужение ДН может скомпенсироваться уширением в реальных наблюдениях вследствие любых погрешностей установки антенны. В то же время на длинных волнах абсолютная величина изменения размера ДНА сравнима с размерами локальных источников и может заметно на них повлиять.

Следует отметить, что при наблюдениях с волноводными облучателями линейные приближения с хорошей точностью воспроизводят размер ДН

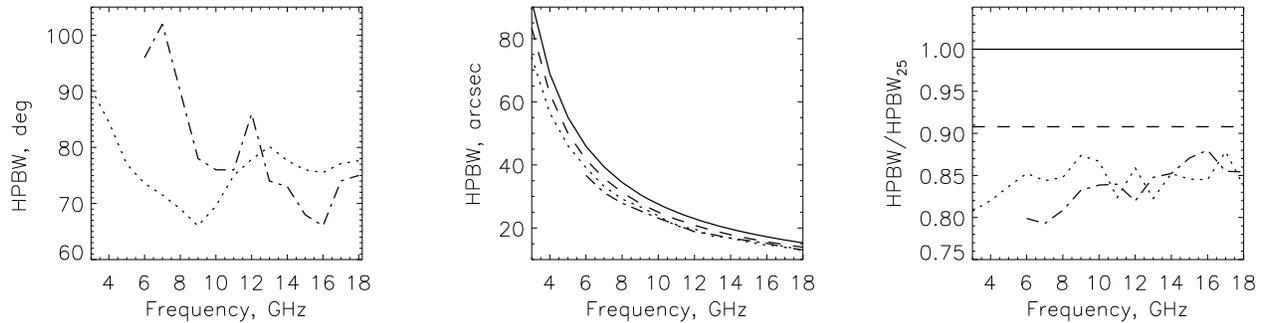


Рис. 5. Слева: спектры размера ДН спиральных облучателей, пунктирная линия — для модели 2–18 GHz, штрихпунктирная линия — для модели 6–18 GHz. В середине: спектры ДНА Ю + П со спиральными облучателями обоих типов (пунктир и штрих-пунктир соответственно) при $\varphi_0 = 33^\circ 4$ и $dx = 17.5$ мм; сплошная линия — $HPBW_{25}$, штриховая — $HPBW_{33.4}$. Справа: то же, что в середине, деленное на $HPBW_{25}$.

во всем диапазоне. Так, $HPBW_{25}$ аппроксимируется прямой $0.2 + 9.2\lambda$ со стандартной ошибкой менее 0.5%. $HPBW_{33.4}$ с той же точностью аппроксимируется зависимостью $0.2 + 8.3\lambda$. Впрочем, с учетом погрешности измерений выражение (1) также является неплохим линейным приближением в этом случае.

Ниже будет показано, что при применении широкодиапазонных облучателей нельзя использовать линейное приближение во всем диапазоне, поскольку расчетный размер ДНА довольно сильно отклоняется от линейной зависимости с изменением длины волны.

3. РАЗМЕР ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СПИРАЛЬНЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ

В период с 2005 г. по сентябрь 2011 г. при наблюдениях Солнца на Ю + П для приема излучения правой и левой круговой поляризации использовались два отдельных спиральных облучателя сантиметрового диапазона и два облучателя дециметрового диапазона (см. рис. 2с). Для минимизации aberrаций в фокус вторичного отражателя был установлен стык между двумя облучателями сантиметрового диапазона. Для диапазона 3–18.2 ГГц смещение из фокуса для каждой из поляризаций составляло $dx = \pm 17.5$ мм, что привело к образованию у ДНА небольшого бокового лепестка (по разные стороны от главного лепестка для разных поляризаций). В программе обработки данных WorkScan [25] была реализована процедура чистки одномерного изображения в спектральной области. В результате такой обработки размеры компактных локальных источников должны быть приведены к их эффективному размеру. С другой стороны, боковой лепесток имеет небольшой уровень — до

3.3% (на 18.2 ГГц), а величина уширения главного лепестка, вызванного смещением из фокуса, пренебрежимо мала, поэтому необходимость чистки зависит от задачи. Тем не менее при расчетах ДНА со спиральными облучателями мы учитывали смещение первичных облучателей из фокуса, также как и увеличенное количество элементов в установке ($\varphi_0 = 33^\circ 4$).

Как было упомянуто в разделе 1, одним из входных параметров при расчете ДНА является диаграмма направленности по полю первичного облучателя. В паспорте облучателей приведены диаграммы направленности на нескольких частотах диапазона и более детальный график зависимости $HPBW$ от частоты. Путем снятия отсчетов на двух частотах было установлено, что диаграмма направленности спирального облучателя с большей точностью имеет форму гауссианы, поэтому на остальных частотах ДНО восстанавливались как гауссианы, имеющие заданное значение $HPBW$ (снятое с графиков). На рис. 5 (левая панель) приведены спектры $HPBW$ спиральных облучателей.

Как общее свойство обеих моделей облучателей можно отметить, что в диапазоне 10–18 ГГц имеются довольно большие флуктуации размера ДНО: $75^\circ \pm 10^\circ$ (рис. 5, левая панель), а на частотах 3–8 ГГц наблюдается устойчивый рост до 90° – 100° . В расчетном спектре ДНА Ю + П (пунктирная и штрихпунктирная линии на рис. 5, средняя и правая панели) флуктуации размера ДНО проявляются на уровне $\pm 3\%$. Как видно из правой панели, размер ДНА при наблюдениях со спиральными облучателями по сравнению с $HPBW_{25}$ уменьшается с частотой примерно на 3–7% на высоких частотах и 11% на низких частотах. Сужение ДНА вследствие увеличения количества элементов в установке составляет порядка $HPBW_{33.4}/HPBW_{25} \approx 9\%$ во всем диапазоне. В пересчете на абсолютные единицы суммарное

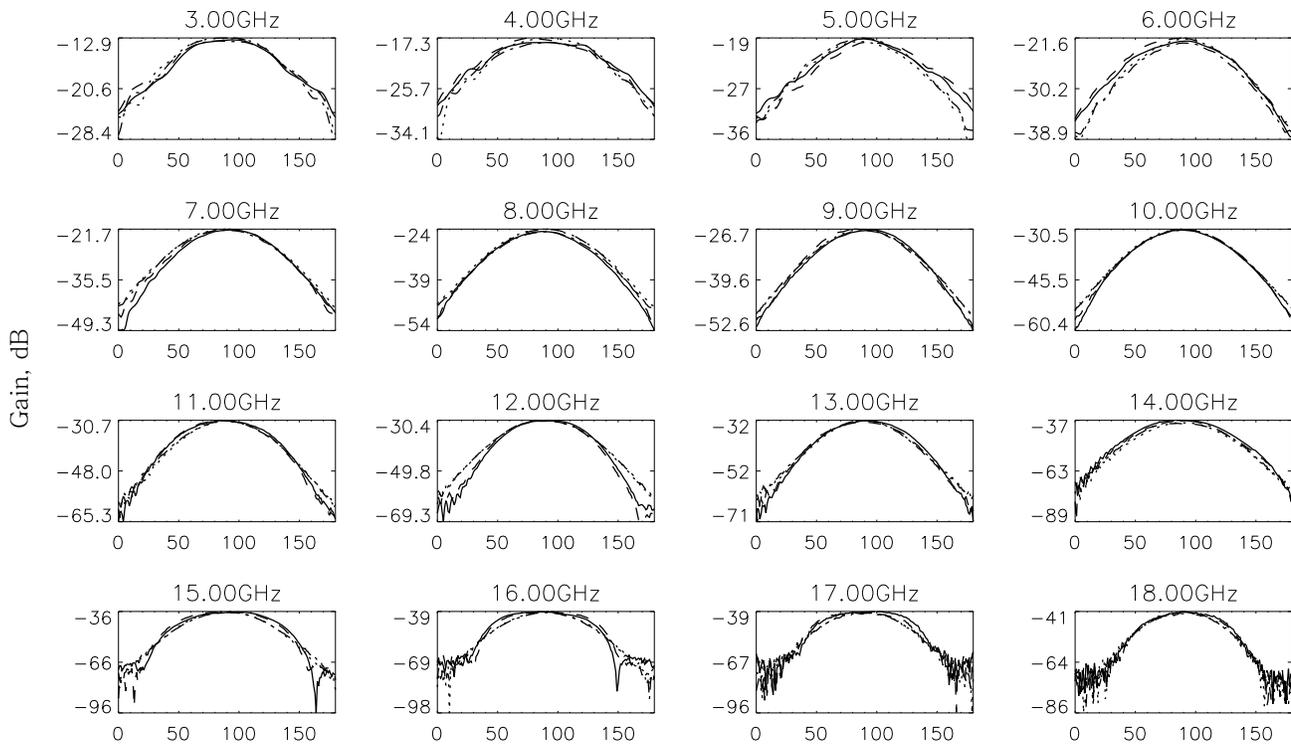


Рис. 6. ДН первичных облучателей синусного типа: cut1 E — сплошная, cut1 H — пунктир, cut2 E — штрих, cut2 H — штрихпунктир. По горизонтальной оси отложен угол в градусах.

сужение ДНА составляет от $2''$ – $4''$ на высокочастотном крае диапазона до $27''$ на низкочастотном.

4. РАЗМЕР ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИНУСНЫХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ

Для расчета ДН в режиме Ю+П с синусными облучателями мы использовали данные измерений ДНО (рис. 6), любезно предоставленные фирмой-изготовителем. Измерения проведены с шагом 40 МГц по частоте и 1° по углу и представлены в виде четырех измерений в главной (cut1) и ортогональной (cut2) плоскостях с излучающей антенной, поляризованной в вертикальной плоскости (E, с электрическим вектором, параллельным плоскости измерения) и горизонтальной плоскости (H, с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости измерения). На рис. 6 приведены диаграммы на шестнадцати отдельных частотах (из общего числа частотных каналов 401). Видно, что на краях диапазона качество диаграмм несколько ухудшается: отклонение формы кривой от гауссианы, симметрия в разных плоскостях и поляризациях, шум.

Для получения ДНО эффективной круговой поляризации (circular polarization — CP) подобных

антенн, имеющих хорошее осевое отношение, достаточно близкой аппроксимацией является среднеквадратичное значение двух линейных поляризаций [26]. С переводом из децибел в разы и возведением в квадрат для преобразования ДН по полю в ДН по мощности, ДН круговой поляризации мы определили путем преобразования:

$$CP = 10 \lg \left(10^{\frac{cut1 E}{10}} + 10^{\frac{cut1 H}{10}} \right).$$

Спектр полуширины полученных диаграмм направленности приведен на рис. 7 слева. Как видно из рисунка, размеры ДНО в приведенном диапазоне возрастают с уменьшением частоты до двух раз, что должно приводить к существенному сужению ДНА Ю+П на низкочастотном крае диапазона. На частотах $f < 11$ ГГц угол облучения $HPBW < 55^\circ$, поэтому ДН Ю+П на этих частотах будет чуть шире, чем при наблюдениях с волноводными облучателями. Как видно из рис. 7 (средняя и правая панели), полученный расчетный размер ДНА Ю+П с синусными облучателями (пунктирная линия) на высокочастотном крае превышает $HPBW_{25}$ примерно на 5%, а в низкочастотной области становится меньше него приблизительно на 20%.

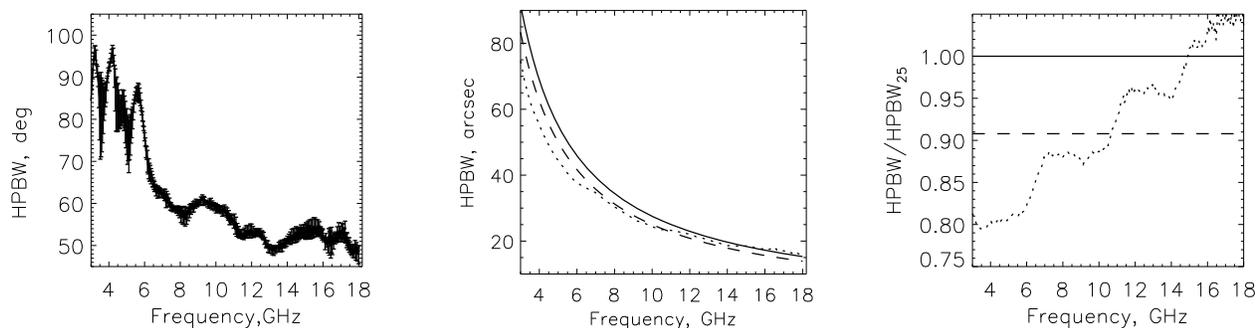


Рис. 7. Слева: спектр размера ДН синусных облучателей в диапазоне 3–18 ГГц. В середине: спектр размера ДН Ю + П с синусными облучателями (при $\varphi_0 = 33^\circ 4'$ и $dx = 7.5$ мм) (пунктирная линия) в сравнении с $HPBW_{25}$ (сплошная линия) и $HPBW_{33.4}$ (штриховая линия) Справа: то же, что и в середине, но отнесенное к $HPBW_{25}$.

5. ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАЗМЕРА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ НА ЭФФЕКТИВНЫЙ РАЗМЕР ИСТОЧНИКОВ

В работе [27] при обработке результатов наблюдений 20 января 2006 г. были использованы расчетные размеры ДНА с учетом максимального количества элементов в установке кругового отражателя $\varphi_0 = 33^\circ 4'$, но ДН используемых в тот период спиральных облучателей при этом не учитывались. Было отмечено «небольшое уменьшение размеров источника с ростом длины волны, что расходится со стандартными представлениями об источниках магнитотормозного излучения над пятнами, для которых ожидается рост размера радиоисточника с ростом высоты и, соответственно, с ростом длины волны». Исходя из этих же представлений мы оценим, позволяет ли рассчитанный нами спектр размера ДНА получить физически правильный спектр размеров локальных источников. Для этого нужно найти симметричный компактный источник на Солнце, отождествленный с униполярным пятном, не совпадающий в вертикальной диаграмме с другими локальными образованиями. Подобный источник может быть найден и в биполярной области над головным пятном, но он должен быть достаточно хорошо отделен от хвостовой части области. Источник должен быть ярким на коротких волнах, чтобы можно было построить спектр во всем диапазоне. Униполярность и яркость на коротких волнах редко встречаются одновременно: чтобы микроволновой источник был ярким на коротких волнах, должно быть достаточно сильное магнитное поле, наличие которого связано со сложной структурой активной области. Поскольку горизонтальное сечение ДНА при смещении по вертикали изменяется, желательно, чтобы источник располагался близко к центру диска. Для наблюдений со спиральными облучателями такая область была найдена — NOAA 10935 за

5 января 2007 г. Область находилась практически в центре диска и обладала значительной степенью поляризации, что свидетельствует о циклотронном механизме излучения. Размер источника будем рассматривать в одной из поляризаций (правой), чтобы избежать влияния неточностей совмещения поляризаций.

Согласно принятой методике обработки локальных источников на Солнце [2], эффективный размер источника B_0 вычисляется исходя из того, что одномерное сглаженное диаграммой антенны наблюдаемое распределение интенсивности описывается гауссианой с шириной B :

$$B_0 = \sqrt{B^2 - HPBW^2}. \quad (3)$$

Это приближение хорошо работает на коротких волнах, где размер компактного источника (типичные размеры $10''$ – $30''$) сравним с размером ДНА (порядка $10''$ – $30''$ в диапазоне 1–4 см). Далее с ростом длины волны размер ДНА быстро растет, а истинный размер источника слабо меняется, поэтому, согласно соотношению (3), зарегистрированный («грязный») размер источника будет сближаться с размером ДН, а величина истинного (эффективного) размера источника становится сравнима с ошибкой измерения (около 10%). При этом легко можно получить такой физически неверный результат, как нулевые размеры источников. Если же реальный размер ДНА уже, чем предполагаемый, кривые пересекутся, и под корнем в (3) получится отрицательное число. На рис. 8 слева показаны спектр «грязного» размера источника (сплошная линия), определенный путем вписывания гауссианы, и два варианта размера ДНА — $HPBW(2)$ (штриховая линия) и рассчитанный нами в разделе 3 с учетом угла облучения спиральных облучателей (пунктирная линия). В точке, где сплошная и пунктирная линии пересекаются, согласно (3) мы получим нулевой размер

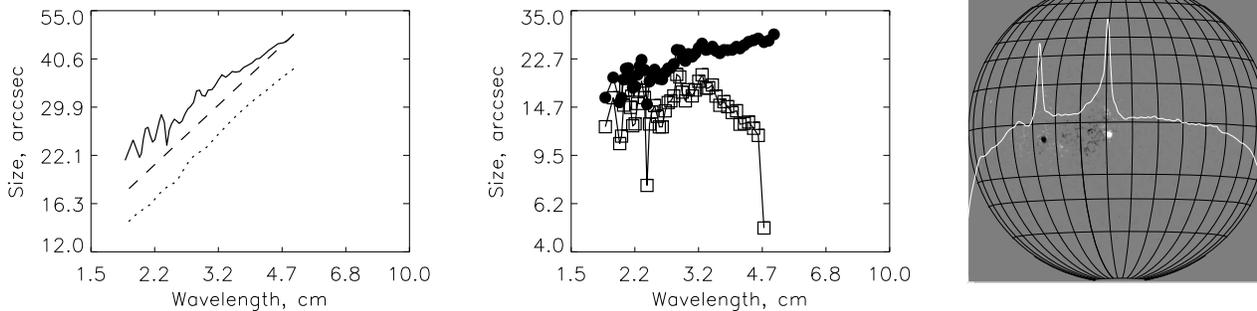


Рис. 8. Слева: «грязный» размер источника АО 10935 (униполярная активная область в восточном полушарии на магнитограмме на правой панели) (сплошная кривая), HPBW(2) (штрих) и расчетный размер ДНА Ю+П со спиральными облучателями (пунктир). В середине: спектры эффективного размера источника после вычитания HPBW(2) (белые квадраты) и расчетного размера ДНА со спиральными облучателями (черные кружки). Справа: наложение скана Солнца РАТАН-600 на волне 2.9 см на магнитограмму SOHO MDI, повернутую на момент наблюдения РАТАН-600.

источника — см. спектр «чистого» размера источника (белые квадраты) на среднем рисунке. При использовании рассчитанного нами размера ДНА с учетом ДН первичного облучателя спирального типа размеры источника перестают убывать на длинных волнах и даже продолжают монотонно расти (средний график, черные кружки). К сожалению, в этот период наблюдения на солнечном комплексе проводились только в высокочастотной конфигурации — от 1.84 см до 5 см, поэтому данных об эффективных размерах источников на низкочастотном крае диапазона не было получено.

Для проверки расчетных размеров источников в наблюдениях с синусными облучателями мы выбрали компактный локальный источник 19 сентября 2013 г., ассоциированный с АО 11843 (см. активную область в центре диска на рис. 9, правая панель). Магнитная структура АО на фотосфере была биполярной. В данном случае нельзя однозначно утверждать, что «чистый» размер источника должен расти с длиной волны, поскольку расхождение силовых линий магнитного поля с высотой в области с сильным биполярным магнитным полем в рассматриваемом диапазоне частот может быть незначительным. Но даже если «чистый» размер источника с длиной волны уменьшается до нуля, «грязный» размер источника (при анализе одной из поляризаций) не должен становиться меньше размера ДНА (поскольку зарегистрированный одномерный профиль антенной температуры T_a является результатом свертки профиля яркостной температуры T_b с диаграммой направленности антенны: $T_a = T_b \times \text{ДНА}$). Для большей точности измерений мы обрабатывали первичные (а не стандартные, усредненные по 30 точек) данные, для удаления высокочастотного шума использовали фильтр нижних частот с характеристикой Баттерворта 6-го порядка с частотой среза до 1–3 Гц. Размер ис-

точника оценивали как напрямую (полный размер на половине максимума), так и путем вписывания гауссианы. Для симметричного источника с одномерным профилем, близким к гауссиане, оба метода дают примерно одинаковые результаты. При этом первый метод более устойчив к ошибкам выделения фона, а второй метод позволяет отделить циклотронный точечный источник от относительно широкой флоккульной подложки, если таковая дает существенный вклад в регистрируемый поток.

Как видно из рис. 9 слева, HPBW(2) (штриховая линия) пересекает «грязный» размер источника (сплошная линия) уже в середине диапазона, а в конце больше него на 40%. В то же время рассчитанный нами размер ДНА с учетом ДН синусного облучателя (пунктирная линия) становится больше размера источника только на последних двух частотах диапазона — 3 ГГц и 3.75 ГГц. Это превышение относительно невелико (порядка 10% от размера источника) и может быть в пределах ошибки метода выделения источника. Спектр эффективного размера источника при использовании полученных нами размеров ДНА стал физически более правильным и в более широком диапазоне не зависит от длины волны (рис. 9, средняя панель). Однако на самом краю диапазона размер источника все же падает, что противоречит стандартной модели магнитотормозного радиоисточника. Предположение, что истинный угол облучения может быть еще шире, не оправдывается: дальнейшее его увеличение практически не влияет на размер ДНА. Конечно, есть определенные упрощения в используемой нами модели, например, ДНО мы считаем симметричной и одинаковой в Е- и Н-плоскостях. Можно еще предположить нестандартное распределение поля в апертуре и т.д. В любом случае учет ДНО дает физически более правильные результаты, чем без учета.

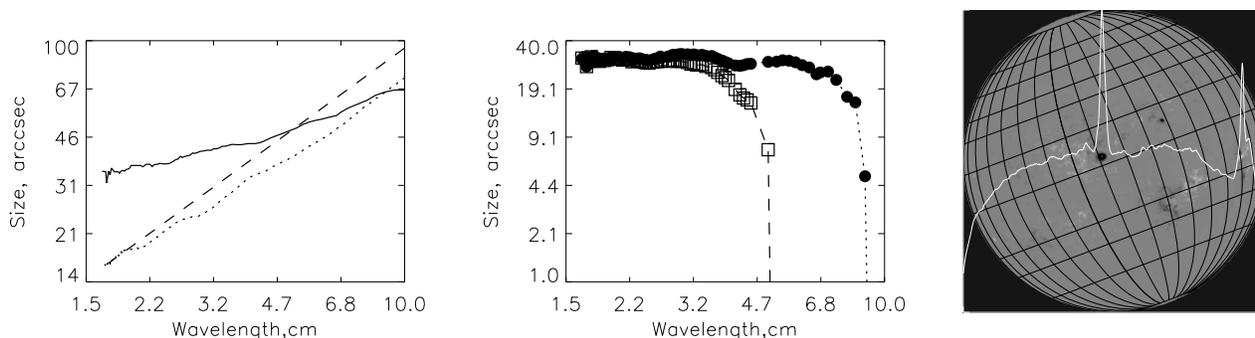


Рис. 9. Слева: «грязный» размер источника АО 11843 (сплошная линия), HPBW(2) (штрих) и расчетный размер ДНА Ю + П с синусными облучателями (пунктир). В середине: спектры эффективного размера источника после вычитания HPBW(2) (белые квадраты) и расчетного размера ДНА с синусными облучателями (черные кружки). Справа: наложение скана Солнца РАТАН-600 на волне 2 см на магнитограмму GONG.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён расчёт ДНА РАТАН-600 в режиме «Южный сектор с плоским отражателем» в приближении геометрической оптики в диапазоне частот 3–18 ГГц с учетом диаграмм направленности первичных облучателей различного типа (волноводных, спиральных и синусных), используемых для наблюдений на солнечном приемном комплексе, а также в зависимости от количества элементов в установке. Выявлено постепенное сужение ДНА Ю + П приблизительно на 10% на длинноволновом крае сантиметрового диапазона при использовании первичных облучателей спирального и синусного типов, а также равномерное относительное сужение ДНА примерно на 10% во всем диапазоне в связи с переходом (в 1998 г.) от наблюдений с пятью группами элементов кругового отражателя к наблюдениям с семью группами элементов. Установлено, что увеличение размера ДНА из-за смещения облучателей из фокуса при наблюдениях со спиральными облучателями пренебрежимо мало. Вычислены спектры размеров двух компактных локальных источников на Солнце, которые показывают, что использование полученных нами расчетных спектров размеров ДНА позволяет получить физически более правильные результаты, чем использование ранее предполагаемых размеров ДНА. Показано, что увеличение размера ДНА при наблюдениях в азимутах, вызванное сокращением количества элементов в установках, может достигать до 20%. Полученные результаты показывают, что разработка новых, более точных методов расчета ДНА РАТАН-600, позволяющих учесть все особенности антенной системы, с использованием современных возможностей вычислительной техники и программных средств может существенно улучшить точность наших знаний о параметрах антенн переменного профиля, а в перспективе — спрогнозировать параметры системы

при использовании новой аппаратуры и разработке новых режимов наблюдений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке гранта РФФИ 14-02-00162-а и программ Президиума РАН (ПАН4 и ПАН22). Наблюдения на РАТАН-600 проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.518.11.7054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О. Н. Шиврис, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **12**, 134 (1980).
2. С. Б. Ахмедов, В. М. Богод, В. Н. Боровик и др., *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **25**, 105 (1987).
3. G. V. Zhekanis, V. K. Kononov, M. G. Mingaliev, and P. G. Tsybulev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **55**, 133 (2003).
4. V. M. Bogod, G. N. Zhekanis, M. G. Mingaliev, and S. Kh. Tokhchukova, *Radiophys. Quantum Electronics* **47**, 227 (2004).
5. В. М. Богод, В. Н. Дикий, Я. В. Корольков и В. Е. Сорель, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **17**, 124 (1983).
6. V. M. Bogod, A. M. Alesin, S. V. Baldin, et al., in *Proc. 11-th European Solar Physics Meeting on The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations*, Ed. by D. Danesy, S. Poedts, A. De Groof, and J. Andries, CD-ROM id. 80.1 (ESA SP-600, 2005), p. 80.
7. В. М. Богод и С. Х. Тохчукова, *Солнечно-земная физика* **16**, 45 (2010).
8. V. M. Bogod, A. M. Alesin, and A. A. Pervakov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 205 (2011).
9. Е. К. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **66**, 90 (2011).
10. А. Н. Коржавин, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. obs.)* **9**, 71 (1977).

11. А. Н. Коржавин, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **11**, 170 (1979).
12. Н. С. Бахвалов, Л. Г. Васильева, Н. А. Есепкина и др., *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **5**, 135 (1973).
13. А. А. Стоцкий, *Известия ГАО* **188**, 63 (1972).
14. О. Н. Шиврис, Ю. К. Постоенко, В. В. Трунов, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **17**, 84 (1983).
15. А. З. Амстиславский, А. И. Копылов, М. И. Промушкин, *Известия ГАО* **188**, 89 (1972).
16. Н. С. Соболева, А. В. Темирова, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **18**, 117 (1984).
17. К. Д. Алиакберов, М. Г. Мингалиев, М. Н. Наугольная и др., *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **19**, 60 (1985).
18. L. V. Opejkina, E. K. Majorova, and A. N. Korzhavin, *Astrophysical Bulletin* **67**, 90 (2012).
19. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.*, No. 125, 46 (1997).
20. S. Kh. Tokhchukova, *Astrophysical Bulletin* **66**, 379 (2011).
21. V. N. Borovik, *Doctoral dissertation in Mathematics and Physics (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 2000)*.
22. A. Nindos, K. Alissandrakis, G. B. Gelfreikh, et al., *Solar Phys.* **165**, 41 (1996).
23. А. В. Темирова, *Астрофиз. исслед. (Известия Спец. астрофиз. обс.)* **19**, 101 (1985).
24. S. V. Baldin and V. I. Garaimov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 371 (2011).
25. V. I. Garaimov, *Preprint No. 127T (Special Astrophysical Observatory, 1997)*.
26. A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Olver, and P. Knight, *The Handbook of Antenna Design*, Vol. 1 (Institution of Electrical Engineers, 1982).
27. A. N. Korzhavin, L. V. Opeikina, and N. G. Peterova, *Astrophysical Bulletin* **65**, 60 (2010).

Computation of the Horizontal Size of the RATAN-600 Beam Pattern for the “Southern Sector with a Flat Reflector” Mode with Allowance for the Parameters of Primary Feeds

S. Kh. Tokhchukova, A. N. Korzhavin, V. M. Bogod, E. A. Kurochkin, and A. V. Shendrik

We report the spectra of the horizontal size of the beam pattern of the RATAN-600 radio telescope operating in the “Southern Sector with a Flat Reflector” observing mode computed in the geometrical optics approximation with allowance for the beam patterns of various primary feeds used in observations with the solar receiver facility in the 3–18 GHz frequency interval. In particular, we show that in the case broadband, spiral, or sinuous feeds are used, the width of the horizontal beam pattern of the antenna decreases with wavelength in the low-frequency part of the spectrum. We compute the spectra of the sizes of two compact local sources on the Sun, which show that the results obtained have to be taken into account when determining the parameters of local sources.

Keywords: *telescopes—radio continuum: general*