

УДК 520.27

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ И КРИВЫЕ ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ В РЕЖИМЕ РАБОТЫ РАТАН-600 С ЗАПАДНЫМ СЕКТОРОМ

© 2023 Е. К. Майорова¹, Н. Н. Бурсов¹, С. А. Трушкин¹¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия¹

Поступила в редакцию 14 февраля 2023 года; после доработки 10 апреля 2023 года; принята к публикации 22 апреля 2023 года

В работе представлены результаты расчета диаграммы направленности (ДН) РАТАН-600 и кривых прохождения через ДН точечных радиоисточников в режиме работы радиотелескопа с Западным сектором на частоте 4.7 ГГц. При расчете ДН были учтены особенности антенной системы радиотелескопа в этом режиме работы: использование вторичного зеркала увеличенных размеров, асимметричное облучение главного зеркала, а также расположение первичных облучателей (рупоров) вдоль фокальной линии вторичного зеркала. Проведено сравнение формы расчетных кривых прохождения источников через ДН с экспериментальными кривыми прохождения, полученными по наблюдениям на Западном секторе. Рассчитаны основные характеристики кривых прохождения, и проведено их сравнение при работе радиотелескопа с Западным и Северным секторами. Предложен новый способ определения плотностей потоков источников, проходящих через ДН вне ее центрального сечения, оценена его точность.

Ключевые слова: *радиоастрономия — радиотелескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Слепые обзоры неба являются одним из основных методов изучения космических объектов и получения информации о радиоисточниках разной природы на радиотелескопе РАТАН-600. В работах Majorova and Bursov (2007) и Majorova (2010) было показано, что с помощью обзоров можно исследовать и электродинамические характеристики радиотелескопа.

Перечислим основные обзоры, проводившиеся на радиотелескопе РАТАН-600. Первый глубокий обзор, с рекордной на то время чувствительностью, был проведен на Северном секторе в эксперименте «Холод» в 1980 г. (Parijskij and Korol'kov, 1986; Soboleva et al., 2006) и повторен на том же склонении источника SS 433 ($\delta = 4^{\circ}56'$) в 1987–2000 гг. (Soboleva et al., 2010). В 1991–1996 годах также на Северном секторе проводился обзор плоскости Галактики в области $\Delta b = \pm 5^{\circ}$, $\Delta l = 342^{\circ} - 17^{\circ}$ на частотах 960 и 3900 МГц (Trushkin, 1996), а с 1998 г. — околосенитный RZF-обзор (RATAN-600 Zenith Field) (Bursov et al., 2007) в диапазоне длин волн 1–55 см на склонении источника 3C 84 (NGC 1275). На Южном секторе с плоским отражателем были проведены «Зеленчукский обзор» (Lagionov, 1989) и полярный обзор 1987–1989 гг.

(Amirkhanian et al., 1988; 1992). С использованием всей кольцевой апертуры телескопа в 1988 г. проводился обзор области неба вблизи $\delta \approx 47^{\circ}06'$ (Mingaliev et al., 1991).

В настоящее время на Западном секторе РАТАН-600 на разных склонениях проводятся обзоры неба на длине волны $\lambda = 6.38$ см. Полученный наблюдательный материал позволяет сравнить расчетную ДН в этом режиме работы с кривыми прохождения космических источников в различных сечениях ДН, а также получить информацию как о точности расчета, так и о влиянии отдельных параметров антенны на ее форму.

2. ОБЗОРЫ НА ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РАТАН-600

Главной целью обзоров, проводимых на Западном секторе с августа 2017 г., является поиск быстрых радиовсплесков на частоте 4.7 ГГц (Trushkin et al., 2018). Одновременно формируется каталог радиоисточников, которые проходят через ДН радиотелескопа и регистрируются в процессе обзоров (Kudryashova et al., 2022). В качестве приемной аппаратуры используются приемники с полосой пропускания 600 МГц, разделенной СВЧ-фильтрами на четыре узких канала с полосами по 150 МГц. В ходе обзоров число независимых

¹E-mail: len@sao.ru

Таблица 1. Обзоры на Западном секторе РАТАН-600. Приведены номер обзора, даты его начала и окончания (колонки 1, 2 и 3); угол места, на который была сфокусирована антенна, название соответствующего источника и его координаты (колонки 4–7); количество лучей или первичных рупоров, с которыми проводились наблюдения (колонка 8), а также величины выносов этих рупоров из фокуса вдоль фокальной линии вторичного зеркала ΔX (колонка 9).

N	Date		Source	RA (J2000), hh:mm:ss.s	Dec (J2000), dd:mm:ss.s	H, dd:mm:ss	N_{beam}	ΔX , mm
	Start	Stop						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	30/08/2017	28/05/2018	3C 48	01:37:41.3	+33:09:35.1	52:21:07	3	–92, 0, 92
2	28/05/2018	30/05/2019	PSR 0531+22	05:34:32.0	+22:00:52.0	32:48:47	3	–92, 0, 92
3	30/05/2019	08/06/2020	SS 433	19:11:49.6	+04:58:56.8	07:23:32	4, 3	–138, –46, 46, 138
4	09/06/2020	26/05/2021	GRS 1915+105	19:15:11.6	+10:56:44.9	16:01:55	4	–138, –46, 46, 138
5	28/05/2021	08/06/2022	3C 138	05:21:09.9	+16:38:22.1	24:29:44	4	–138, –46, 46, 138
6	15/07/2022	–	PKS 1345+12	13:47:33.4	+12:17:24.1	17:47:49	4	–138, –46, 46, 138

радиометров (лучей) было доведено до четырех. В 2021 году был добавлен радиометр, принимающий излучение на частоте 2.3 ГГц, в 2022 году — на частоте 15 ГГц. Минимальная плотность потока от точечного источника в обзорах в одном наблюдении в полной полосе частот составляет около 5 мЯн.

Применяемая в обзорах на Западном секторе РАТАН-600 аппаратура создана сотрудниками лаборатории радиометров континуума¹. Они же осуществляют регистрацию и привязку к местному среднему звездному времени.

Всего к настоящему моменту проведено шесть обзоров с неподвижной антенной, сфокусированной на угол места H одного из выбранных источников. Основные сведения о них приведены в таблице 1 (колонки 2, 3, 4). Там же приводятся номера обзоров (колонка 1), угол места, на который была сфокусирована антенна (колонка 5), даты начала и конца обзоров (колонки 6 и 7), количество лучей или первичных рупоров, с которыми проводились наблюдения (колонка 8), величины выносов этих рупоров из фокуса вдоль фокальной линии вторичного зеркала ΔX (колонка 9).

3. РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Одной из важнейших электродинамических характеристик радиотелескопа является диаграмма направленности его антенной системы. Знание ДН необходимо для точных измерений характеристик источников космического излучения.

¹<https://www.sao.ru/hq/lrk/strlrk.html>

Антенна РАТАН-600 представляет собой антенну переменного профиля (АПП), у которой перемещение луча диаграммы направленности в пространстве происходит не за счет поворота всего отражателя в целом, как в случае параболоидов вращения, а за счет изменения формы главного зеркала (ГЗ) и перемещения по радиальным путям вторичного зеркала. При этом форма и ширина ДН антенны меняется в зависимости от направления на исследуемый источник.

Исследованию ДН РАТАН-600 посвящен ряд работ, в которых использовались как расчетные (Esepkina et al., 1979a, 1979b, 1980, 1982; Korzhavin, 1979; Majorova, 2002), так и экспериментальные (Temirova, 1983, 1985; Majorova and Trushkin, 2002) методы. Необходимость в таком подробном изучении ДН связана прежде всего с ее сложной структурой и тем, что форма диаграммы меняется с изменением высоты наблюдаемого источника. Кроме того, существенное увеличение чувствительности РАТАН-600 за последние десятилетия, в частности его приемной аппаратуры, потребовало более детального исследования главного лепестка ДН на больших угловых расстояниях от его оси.

Результаты детального сравнения расчетных и экспериментальных диаграмм направленности и их согласование получены в работах Majorova (2002) и Majorova and Trushkin (2002). Было показано, что учет дифракционных эффектов в раскрые главного зеркала и конечного вертикального размера его отражающих элементов (Majorova, 2002) дает хорошее согласие с результатами измерений ДН в большом телесном угле, вплоть до уровня 0.5% от максимума ДН (Majorova and Trushkin,

2002). Это позволяет осуществлять более глубокую обработку данных и при необходимости «чистить» записи наблюдений от ярких внеосевых фоновых источников.

Для расчета ДН в настоящей работе использовалась компьютерная программа, написанная на основе работ Esepkina et al. (1979a; 1980), Korzhavin (1979) и Majorova (2002). Все основные формулы, используемые в программе, приведены в работе Majorova (2002). Поле в апертуре главного зеркала рассчитывалось с учетом дифракционных эффектов, исходя из компонент электрического вектора поля в раскрыве вторичного зеркала, представляющего собой несимметричный параболический цилиндр. Поле в раскрыве последнего рассчитывалось, исходя из диаграмм направленности первичных рупоров, располагающихся на фокальной линии вторичного зеркала (Korzhavin, 1979).

При проведении обзоров на Западном секторе РАТАН-600 использовалось модифицированное вторичное зеркало, так называемый тип 5, у которого увеличены вертикальный и горизонтальный размеры по сравнению с зеркалом типа 1. При этом угол облучения главного зеркала в горизонтальной плоскости остался неизменным (около 120°). Целью увеличения вертикального размера вторичного зеркала было уменьшение дифракционных эффектов на отражающих элементах главного зеркала и уменьшение его переоблучения по вертикали на длинных волнах ($\lambda > 6$ см).

Расчет ДН осуществлялся с учетом размеров вторичного зеркала и ДН рупоров. Кроме того, было учтено, что количество отражающих элементов главного зеркала уменьшено по сравнению с режимом наблюдений на Северном секторе: до 63 щитов с западной стороны относительно оси антенны и до 86 — с северной, что привело к асимметрии раскрыва ГЗ.

На рис. 1 показаны примеры нормированных двумерных ДН радиотелескопа на длине волны 6.38 см, рассчитанные для обзоров N1–N4 с учетом указанных особенностей наблюдений на Западном секторе. Изофоты проведены с шагом 0.05. Номера обзоров (N) и названия источников, на которые была сфокусирована антенна в каждом из обзоров, приведены в таблице 1. Там же приводятся и высоты источников H . Из рисунков видно, что вертикальные размеры ДН уменьшаются с увеличением H . Существенно меняется и форма ДН.

Как показали расчеты, изменение размеров вторичного зеркала привело к незначительному сужению вертикального размера ДН, и только на самых низких углах места ($H \leq 7^\circ 5'$). Тем самым подтверждается ранее обнаруженный факт, что влияние дифракционных эффектов на ДН начинает сказываться лишь на волнах длиннее 6 см (Majorova,

2002). Асимметрия облучения главного зеркала проявляется на всех высотах, однако слабо. Различия в величинах полуширин кривых прохождения, рассчитанных с симметричной и асимметричной апертурой, составили не более 10%.

На рис. 2 представлены: (а) — вертикальные ДН (F_v), (б) — зависимости полуширины ДН ($HPBW$) в различных горизонтальных сечениях, параллельных оси X (см. рис. 1), от dH , рассчитанные с учетом вышеперечисленных особенностей антенной системы при наблюдениях на Западном секторе. dH — разность между высотой установки антенны H_0 и высотой наблюдаемого источника H ($dH = H - H_0$). dH совпадает с осью Y (рис. 1). Под вертикальной ДН мы подразумеваем максимальные значения диаграммы направленности F_{max} в различных горизонтальных сечениях, нормированные к максимуму ДН в центральном горизонтальном сечении при сфокусированной антенне. В этом случае максимумы ДН в различных горизонтальных сечениях лежат в вертикальной плоскости, проходящей через $X = 0$. Полученные зависимости рассчитаны для сфокусированной антенны, когда первичный рупор находится в фокусе антенны.

4. СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ И РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ ПРОХОЖДЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЧЕРЕЗ ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ

Антенна радиотелескопа РАТАН-600 (Khaikin et al., 1972) имеет форму кольца и разделена на четыре сектора: Северный, Восточный, Южный и Западный, азимуты которых равны соответственно $A = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ и 270° . Радиоисточники, наблюдаемые на каждом из секторов, проходят через ДН под параллактическим углом q , который связан со склонением наблюдаемого источника δ , широтой места радиотелескопа φ и азимутом A следующим соотношением:

$$\sin q = \cos \varphi \sin A / \cos \delta. \quad (1)$$

Широта места РАТАН-600 составляет $\varphi = 43^\circ 83'$.

В режиме работы с Северным и Южным секторами угол $q = 0$, источники проходят через ДН параллельно оси X (рис. 1). Координата X соответствует прямому восхождению RA (или часовому углу t), координата Y — разности высот dH или разности склонений $d\delta = \delta - \delta_0$, где δ_0 — склонение источника, на который сфокусирована антенна радиотелескопа. При наблюдениях на Северном секторе $dH = d\delta$.

В режиме работы с Западным сектором параллактический угол равен:

$$q = \arcsin(-\cos 43^\circ 83' / \cos \delta). \quad (2)$$

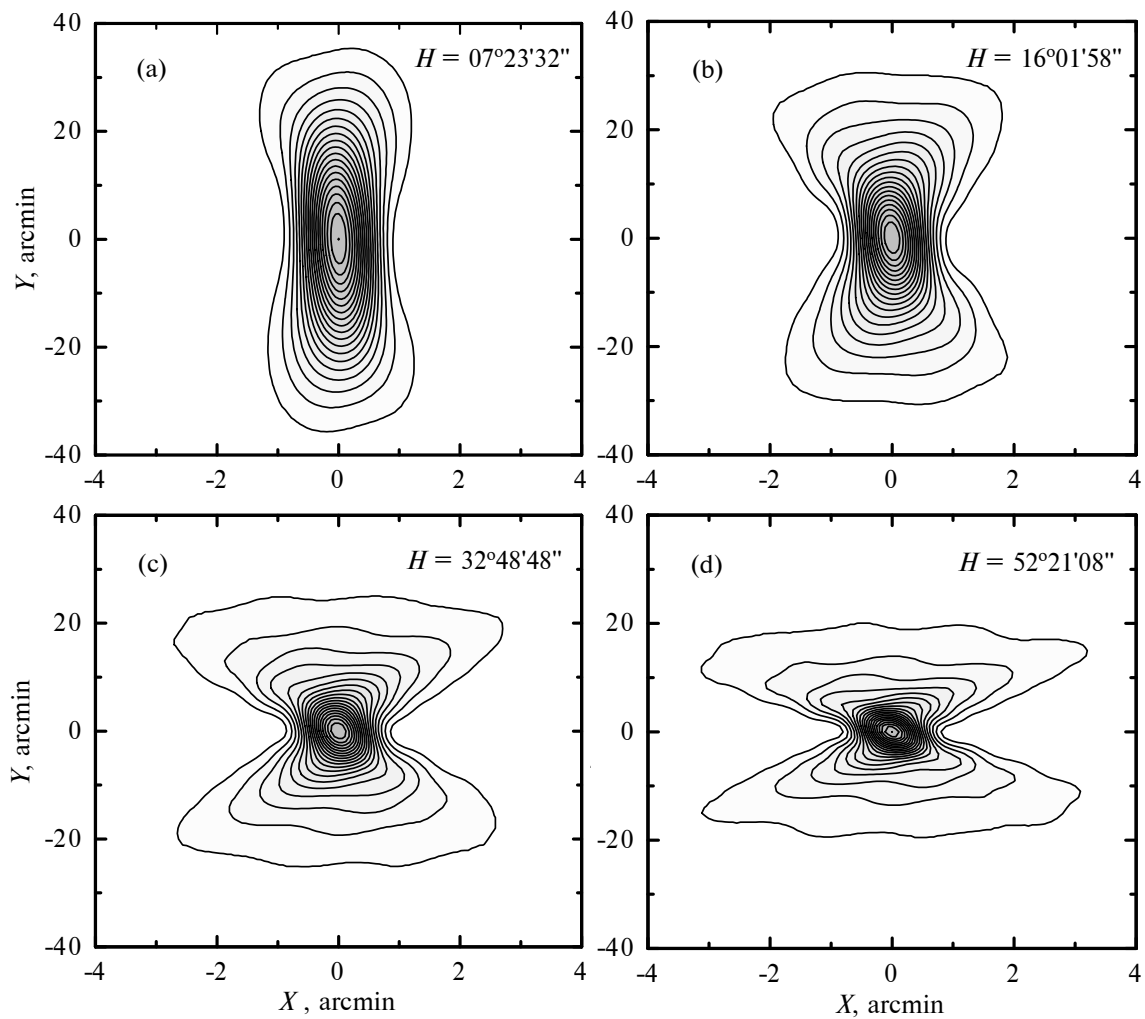


Рис. 1. Нормированные двумерные ДН радиотелескопа РАТАН-600 на волне 6.38 см, рассчитанные с учетом особенностей наблюдений на Западном секторе, для разных высот источников, на которые была сфокусирована антенна в каждом из обзоров: (a), (b), (c), (d) — обзоры N3, N4, N2, N1 соответственно. Изофоты проведены с шагом 0.05.

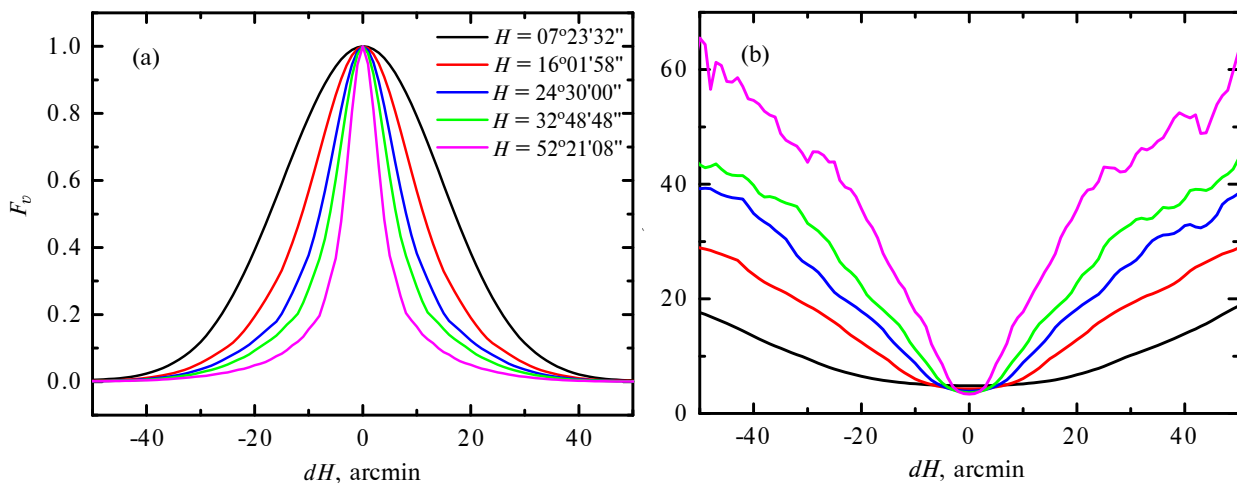


Рис. 2. Вертикальные ДН (F_v) (a) и полуширины ДН ($HPBW$) в различных горизонтальных сечениях (b) в зависимости от dH , рассчитанные с учетом особенностей антенной системы при наблюдениях на Западном секторе для различных высот источников, на которые была сфокусирована антенна в обзорах N1–N5.

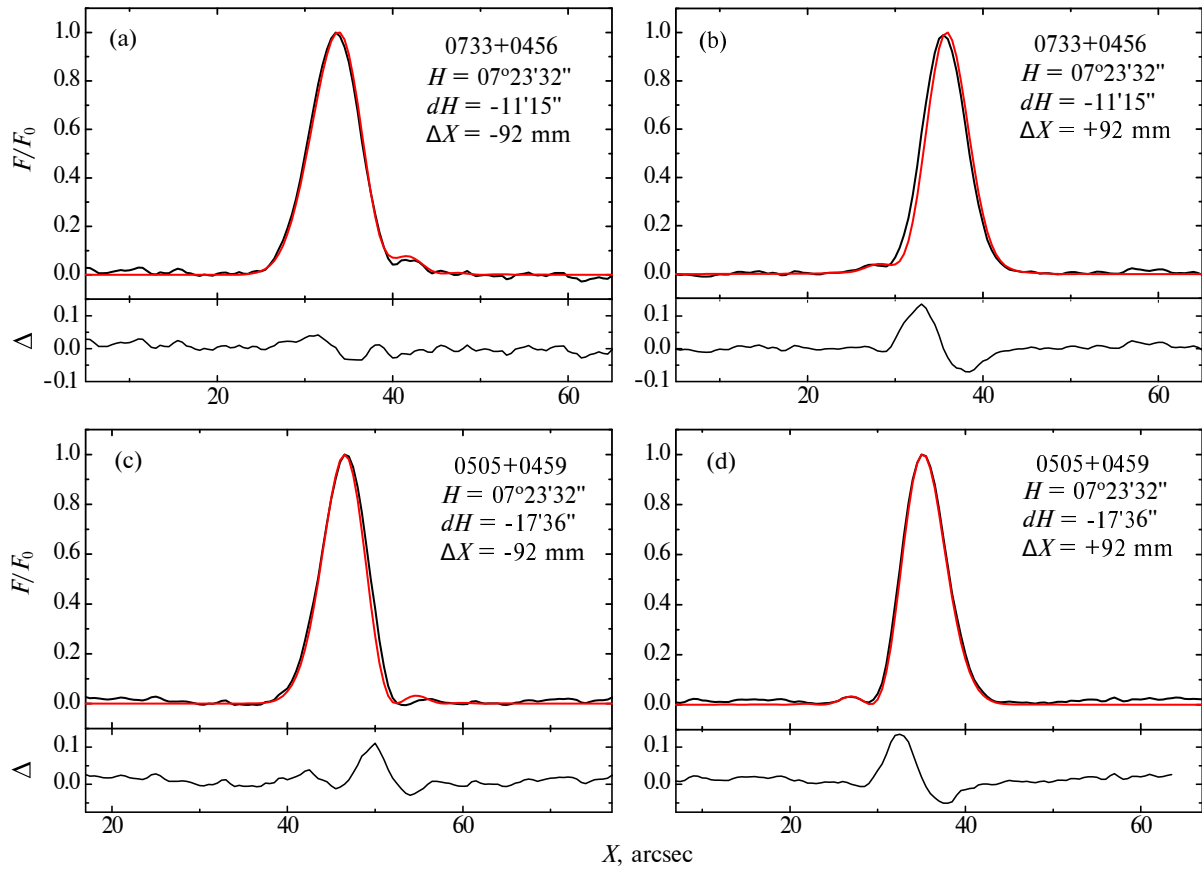


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные кривые прохождения источников J073357+045614 и J050523+045942 через ДН в обзоре N3 на Западном секторе (красные и черные линии соответственно) и их разности Δ . Справа на панелях указаны названия источников, высоты H , на которые была сфокусирована антенна в обзоре, значения dH прохождения источника относительно центрального сечения и величины выносов первичных облучателей из фокуса ΔX .

Чтобы рассчитать кривую прохождения точечного источника через ДН радиотелескопа при наблюдениях на Западном секторе, был осуществлен переход от системы координат (X, Y) (рис. 1) к системе координат (X', Y') , которая получена путем вращения вокруг начала системы координат (X, Y) на угол q . В этой новой системе координат X' — прямое восхождение RA' (или часовой угол t') источника со склонением δ' , проходящего через ДН в режиме наблюдений на Западном секторе под углом q к оси X , координата $Y' = d\delta' = \delta' - \delta'_0$, где δ' — склонение наблюдаемого источника, δ'_0 — склонение источника, на который сфокусирована антенна. В режиме работы с Западным сектором dH и $d\delta'$ связаны соотношением: $d\delta' = dH \cos q$.

Переход от координат (X, Y) к координатам (X', Y') осуществлялся по стандартным формулам преобразования декартовых координат:

$$X' = X \cos q - Y \sin q; Y' = Y \cos q + X \sin q. \quad (3)$$

С помощью перехода к координатам (X', Y') довольно просто вычисляются значения мощностной

ДН РАТАН-600 в точках, которые соответствуют прохождению источника через ДН на небесной сфере под углом q . Расчет ДН осуществляется по алгоритму, описанному в работе Мажогова (2002).

На рис. 3–7 показаны кривые прохождения источников через ДН при проведении обзоров N1–N3, N5 и N6 (черные линии) и расчетные кривые прохождения (красные линии). Там же приводятся разницы между экспериментальными и расчетными кривыми прохождения Δ . На панелях указаны названия источников, высоты H , на которые была сфокусирована антенна в обзоре, dH и величины выносов первичных облучателей из фокуса ΔX . Кривые прохождения нормированы на максимумы антенных температур. Ось dH совпадает с осью Y в системе координат (X, Y) ($dH = H - H_0$). Рисунки приводятся в порядке увеличения высот обзоров H .

Проведено сравнение полуширин экспериментальных кривых прохождения $HPBW_{\text{exp}}$ с полуширинами кривых прохождения, полученных расчетным путем $HPBW_{\text{cal}}$. Оценивались отноше-

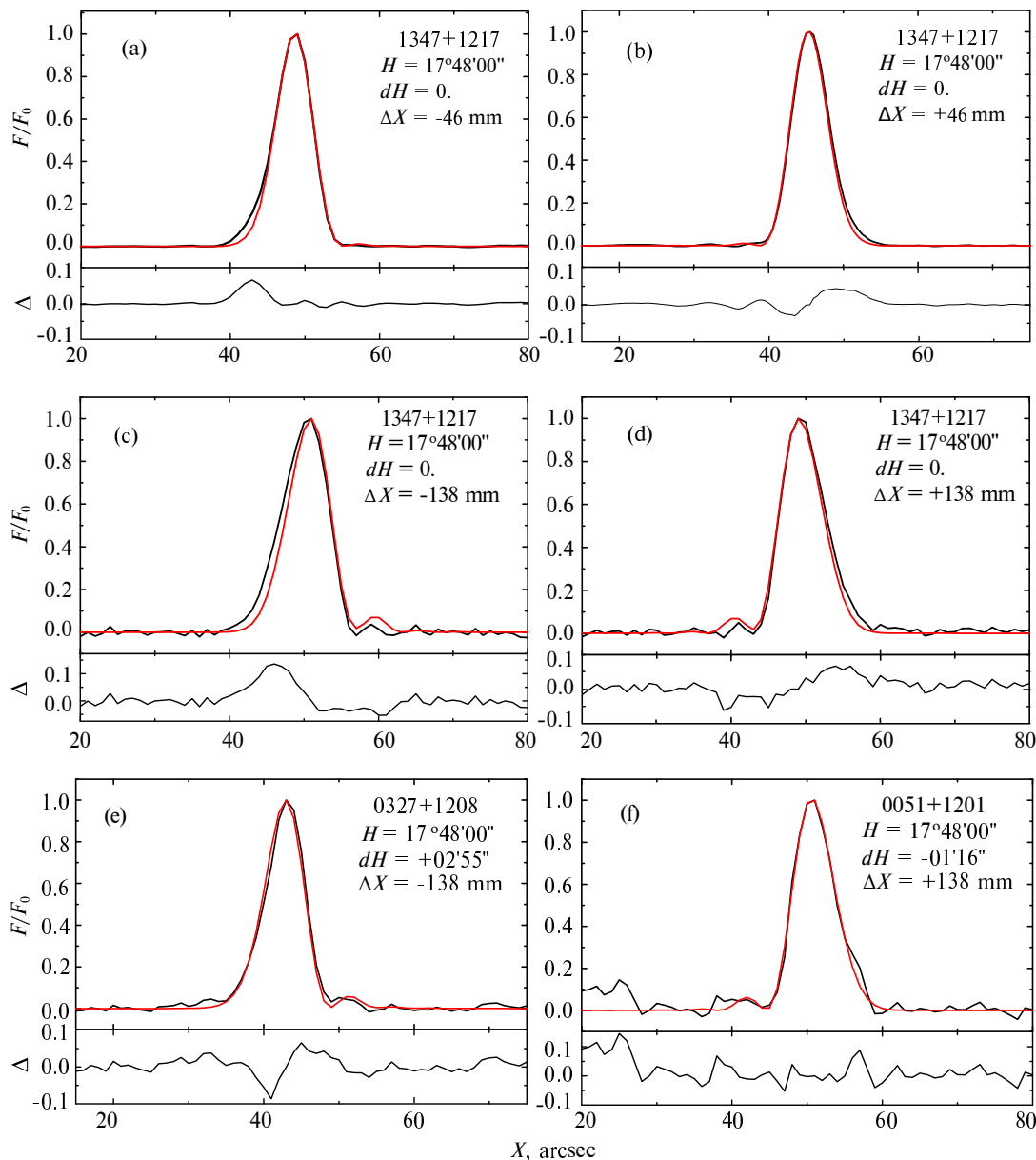


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для источников J134733+121724, J032723+120835 и J005146+120144 для обзора N6.

ния $HPBW_{\text{exp}}/HPBW_{\text{cal}}$ для всех высот обзоров и выносах первичных облучателей из фокуса при различных прохождениях источников относительно центрального сечения. Среднее значение этого отношения составило 1.06 ± 0.05 , медианное — 1.05. Величина $HPBW_{\text{exp}}/HPBW_{\text{cal}}$ может зависеть от отношения сигнал/шум на записи прохождения источника, от структуры источника, величины dH , а также от точности фокусировки антенной системы. К некоторому уширению кривых прохождения может приводить и их усреднение. При этом согласие расчетов с наблюдательными данными для большинства источников хорошее и

лежит в пределах точностей экспериментальных кривых.

5. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КРИВЫХ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ НА СЕВЕРНОМ И ЗАПАДНОМ СЕКТОРАХ РАТАН-600

Как отмечалось ранее, вид диаграмм направленности при наблюдениях на Западном и Северном секторах на длине волны 6.38 см различается незначительно, и в основном на низких высотах. Связаны эти различия с использованием вторичного зеркала больших размеров и с асимметричным

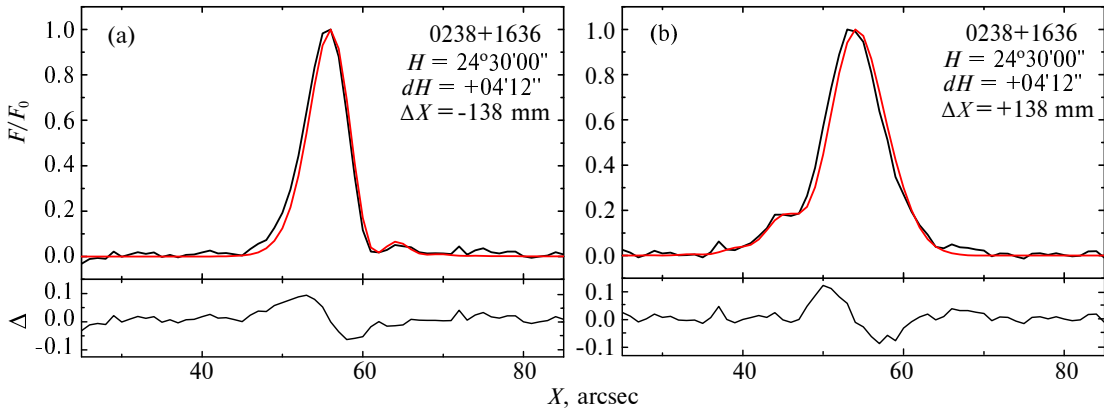


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для источника J023838+163658 для обзора N5.

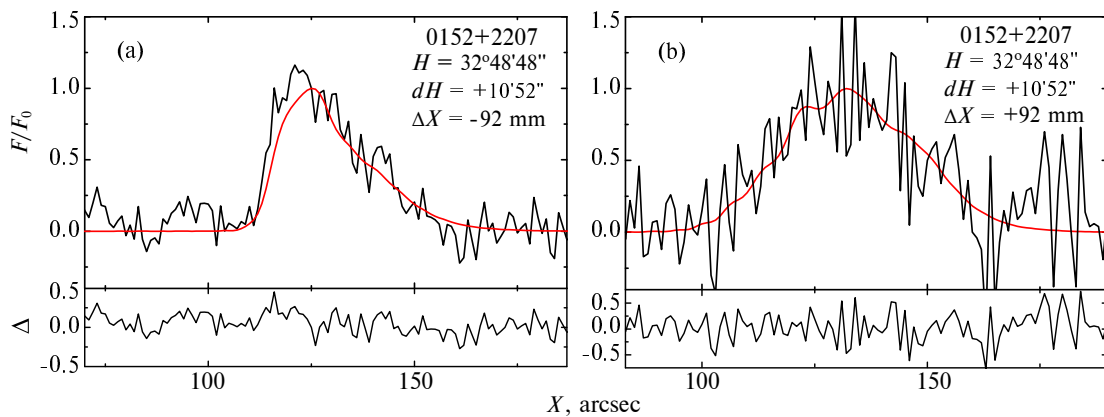


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для источника J015218+220707 для обзора N2.

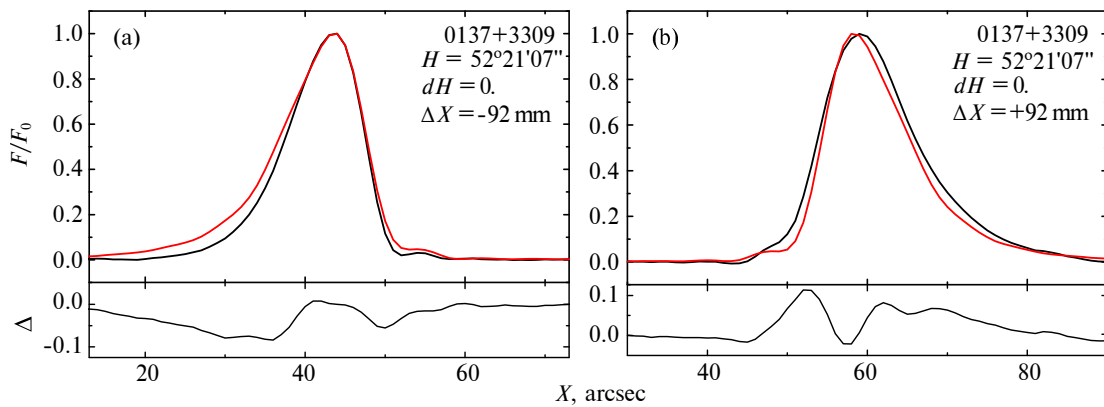


Рис. 7. То же, что на рис. 3, для источника J013741+330935 для обзора N1.

облучением главного зеркала. Однако кривые прохождения источников через ДН будут отличаться, и тем существеннее, чем больше параллактический угол, под которым источники проходят через ДН.

Чтобы продемонстрировать эти различия и оценить их количественно, для обоих режимов работы были проведены расчеты следующих зависимостей:

- 1) зависимость F_{\max} кривой прохождения от величины dH ;
- 2) зависимость полуширины кривой прохождения $HPBW$ от dH ;
- 3) зависимость произведения $F_{\max} \times HPBW$ от dH .

Зависимости рассчитывались для различных вы-

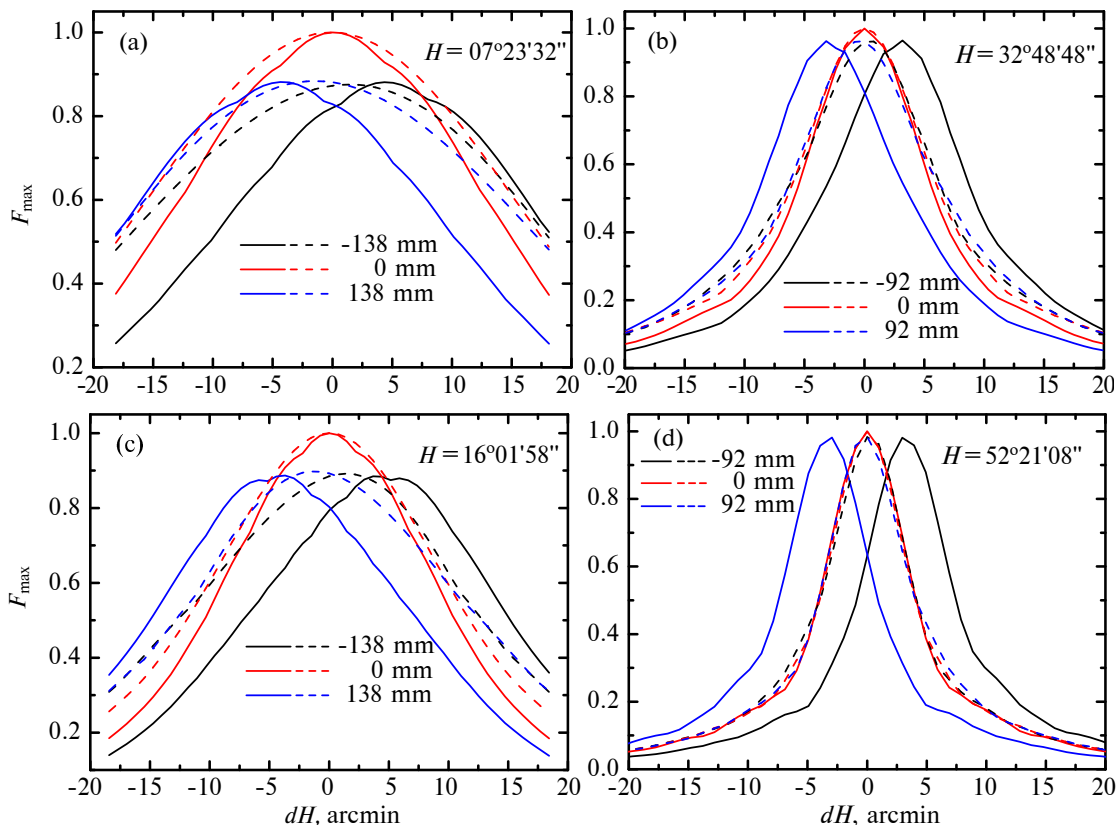


Рис. 8. Зависимости максимума кривых прохождения F_{\max} от dH , рассчитанные для обзоров N1–N4. Сплошными линиями показаны $F_{\max} = f(dH)$, рассчитанные в режиме наблюдений на Западном секторе, штриховыми — на Северном. На панелях показаны величины высот источников H , на которые была сфокусирована антенна в каждом из обзоров, и величины выносов первичных облучателей из фокуса.

носов первичных облучателей из фокуса ΔX , используемых в обзорах (см. таблицу 1).

На рис. 8 приведены зависимости $F_{\max} = f(dH)$, на рис. 9 — зависимости $HPBW = f(dH)$, на рис. 10 — $F_{\max} \times HPBW = f(dH)$. Сплошными линиями показаны зависимости, рассчитанные при наблюдениях на Западном секторе, штриховыми — на Северном. Зависимости рассчитаны для обзоров N1–N4. На панелях показаны величины высот источников H , на которые была сфокусирована антенна в каждом из обзоров, и величины выносов первичных облучателей из фокуса.

В случае, когда первичный облучатель располагается в фокусе антенны ($\Delta X = 0$), зависимости $F_{\max} = f(dH)$ имеют меньшую полуширину при наблюдениях на Западном секторе, чем при наблюдениях на Северном секторе, что является следствием увеличенного вертикального размера вторичного зеркала (тип 5). Эффект тем больше, чем меньше высота, на которую сфокусирована антенна.

При наблюдениях на Западном секторе с вынесенными из фокуса первичными рупорами происходит смещение максимумов зависимостей

$F_{\max} = f(dH)$ и $F_{\max} \times HPBW = f(dH)$ и смещение минимумов кривых $HPBW = f(dH)$. Смещения тем больше, чем меньше высота, на которую сфокусирована антенна. При наблюдениях на Северном секторе эти смещения имеют место только на низких высотах. Связано это с тем, что aberrации при наблюдениях как на Северном, так и на Западном секторе тем больше, чем ниже высота H . Однако при наблюдениях на Западном секторе, как видно из приведенных графиков, влияние aberrаций гораздо существеннее, чем при наблюдениях на Северном секторе.

6. ОЦЕНКА ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ ИСТОЧНИКОВ В РЕЖИМЕ РАБОТЫ С ЗАПАДНЫМ СЕКТОРОМ

При прохождении точечного неполяризованного источника² через центральное сечение ДН его антенная температура на выходе радиометра и спектральная плотность потока связаны следующим

²Точечный источник — это источник, размеры которого Ω_{source} много меньше размеров ДН антенны ($\Omega_{\text{source}} \ll \Omega_{\text{DN}}$).

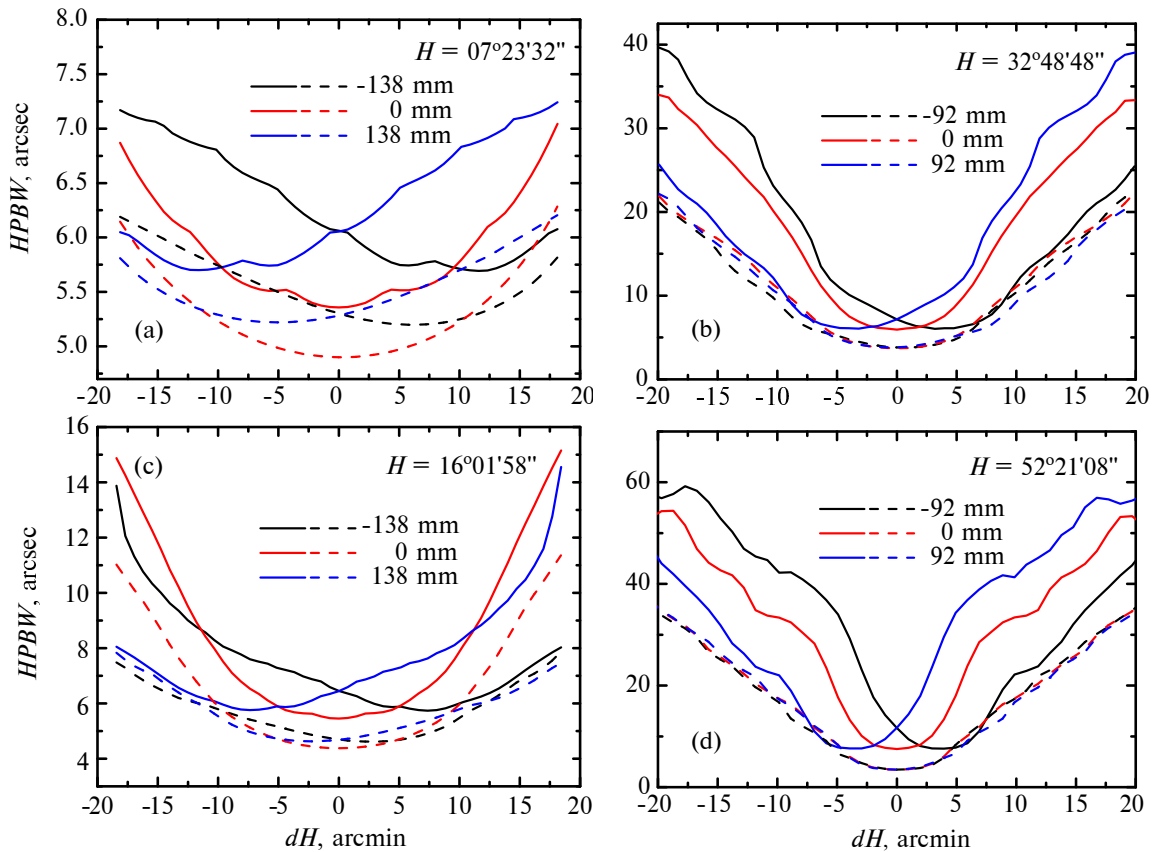


Рис. 9. То же, что на Рис. 8, но для HPBW.

соотношением (Eserkina et al., 1973):

$$P/T_a = 2k/S_{\text{eff}}, \quad (4)$$

где k — постоянная Больцмана, S_{eff} — эффективная площадь антенны радиотелескопа (1000 м^2), T_a — антенная температура источника (К), приведенная к центральному сечению, и P — спектральная плотность потока источника ($\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ Гц}$);

$$S_{\text{eff}} = \lambda^2/\Omega_{\text{DN}}, \quad (5)$$

где $\Omega_{\text{DN}} = \int_{4\pi} F d\Omega$ — телесный угол диаграммы направленности F .

При прохождении источника через сечение ДН, удаленное от центрального на величину dH по склонению, его антенная температура в случае сфокусированной антенны будет уменьшаться в соответствии с изменением вертикальной ДН $F_v(dH)$, в общем случае — в зависимости максимальных значений диаграммы направленности F_{max} в различных горизонтальных сечениях от dH (Majorova and Bursov, 2007; Majorova, 2010):

$$F_v(dH) = \frac{(P/T_a)_{dH=0}}{(P/T_a)_{dH}} = \frac{(T_a)_{dH}}{(T_a)_{dH=0}}. \quad (6)$$

Величина $2k/(P/T_a)_{dH=0}$ характеризует эффективную площадь антенны (Majorova, 2010).

Отметим, что приведенные соотношения выполняются как при наблюдениях на Северном, так и на Западном секторе радиотелескопа. В работах Majorova and Bursov (2007) и Majorova (2010) эти соотношения были использованы для построения экспериментальных ДН и определения плотностей потоков источников, которые наблюдались в обзорах «Холод» (Parijskij and Korol'kov, 1986; Soboleva et al., 2006; 2010) и RZF (Bursov et al., 2007). С этой целью строились зависимости $P^i/T_a^i = f(dH)$ для выборки достаточно ярких калибровочных радиоисточников с известными потоками P^i и антенными температурами T_a^i , измеренными в процессе обзоров. Для определения плотностей потоков источников P^s , которые проходят на расстоянии dH от центрального сечения обзора, использовались аппроксимирующие кривые зависимостей $P^i/T_a^i = f(dH)$ и величины T_a^s этих источников.

В настоящей работе для оценки плотностей потоков источников, наблюдаемых в обзорах на Западном секторе РАТАН-600, предлагается исполь-

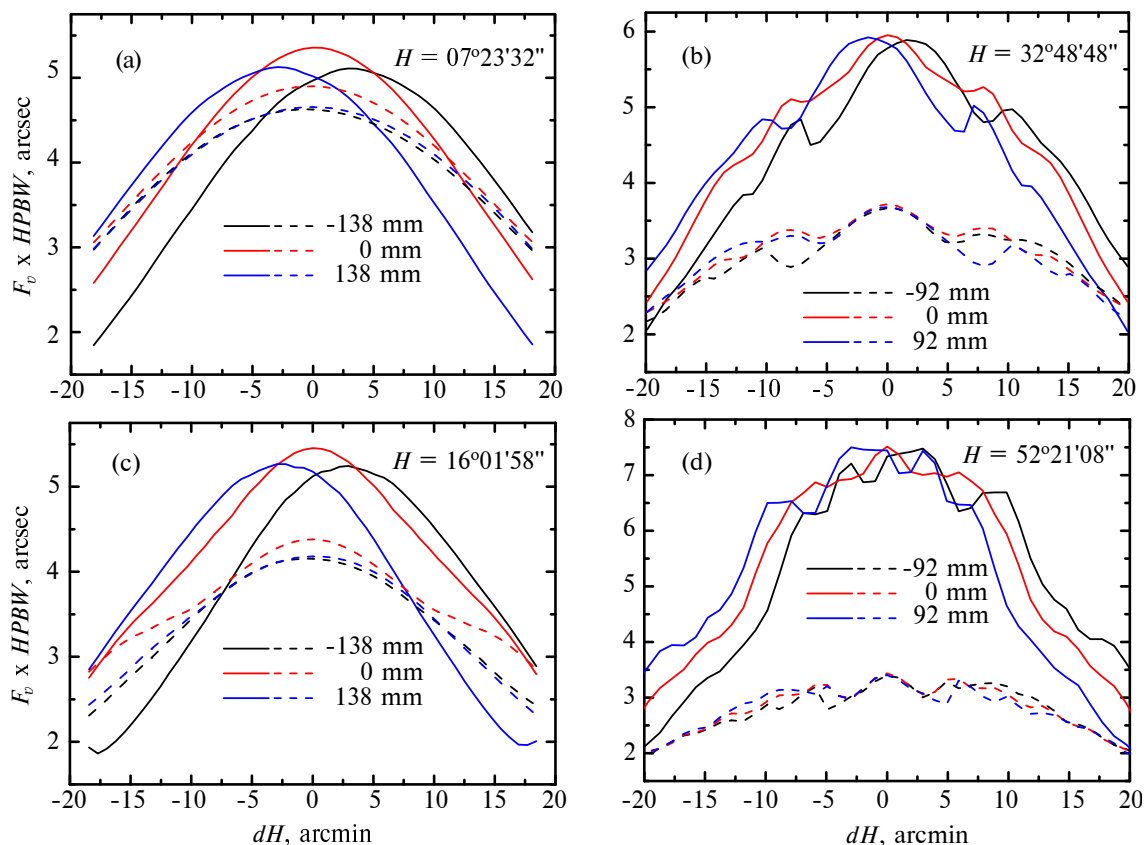


Рис. 10. Зависимости произведения $F_{\max} \times HPBW$ от dH . Сплошными линиями показаны зависимости, рассчитанные в режиме наблюдений на Западном секторе, пунктирными — на Северном. $F_{\max} \times HPBW = f(dH)$ рассчитаны для обзоров N1–N4 (панели (a)–(d) соответственно). На панелях показаны величины высот источников H , на которые была сфокусирована антенна в каждом из обзоров, и величины выносов первичных облучателей из фокуса.

зывать расчетные величины F_{\max} и полученные из кривых прохождения величины T_a этих источников.

Зная величину плотности потока опорного источника P^0 , на который сфокусирована антенна, его антенную температуру T_a^0 , а также расчетное значение максимума ДН F_{\max}^0 , можно найти эффективную площадь антенны:

$$S_{\text{eff}} = \frac{2k T_a^0}{P^0 F_{\max}^0}. \quad (7)$$

Поскольку только при расположении приемного рупора в фокусе антенны принимается весь поток излучения от радиоисточника, необходимо учитывать величину F_{\max}^0 , которая характеризует абберационные эффекты при выносах рупоров из фокуса. Величина F_{\max}^0 равна 1, когда $\Delta X = 0$, при $\Delta X \neq 0$ она уменьшается в соответствии с абберационной кривой.

Используя формулу (6), можно записать выражение для искомой плотности потока источника P^x , проходящего на расстоянии dH от центрального сечения ДН в системе координат (X, Y) под

углом q к нему:

$$P^x = P^0 \frac{T_a^x F_{\max}^0}{T_a^0 F_{\max}^x}, \quad (8)$$

где T_a^x и F_{\max}^x — соответственно антенная температура источника и максимум ДН в сечении dH .

Как отмечалось выше, величина dH связана с разницей склонений наблюдаемого источника и склонением источника, на который сфокусирована антенна, соотношением: $d\delta' = dH \cos q$.

Антенная температура T_a^x определяется из кривой прохождения источника, F_{\max}^x — рассчитывается.

Как уже отмечалось, обзоры на Западном секторе проводились одновременно в нескольких лучах с тремя или четырьмя рупорами, вынесенными из фокуса на величину ΔX (таблица 1). Для проверки предложенного метода была проведена оценка плотностей потоков источников, наблюдавшихся в обзоре N6, с использованием данных об их антенных температурах T_a^x в каждом из лучей (рупоров) и величинах F_{\max}^x , рассчитанных с учетом выноса каждого рупора из фокуса. Поскольку

Таблица 2. Антенные температуры источников T_a , полученные из кривых прохождения в обзоре N6, и рассчитанные величины максимумов ДН F_{\max} в сечениях dH при выносах рупоров из фокуса на $\Delta X = -138$ мм, -46 мм, $+46$ мм и $+138$ мм

NVSS name	$(T_a)_{-138}$, mK	$(F_{\max})_{-138}$	$(T_a)_{-46}$, mK	$(F_{\max})_{-46}$	$(T_a)_{+46}$, mK	$(F_{\max})_{+46}$	$(T_a)_{+138}$, mK	$(F_{\max})_{+138}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
J005146+120144	46.5	0.696	56.9	0.900	59.6	0.98	51.5	0.847
J032723+120835	144.0	0.894	148.7	0.928	116.9	0.76	95.1	0.604
J072832+121010	71.8	0.580	81.2	0.733	98.8	0.90	99.3	0.893
J100252+121614	63.8	0.726	74.9	0.907	77.7	0.98	67.2	0.839
J132748+121322	22.1	0.512	25.9	0.687	33.0	0.82	34.7	0.874
J132754+122311	82.8	0.814	71.0	0.719	53.4	0.53	45.8	0.444
J134733+121724*	835.0	0.784	1018.0	0.960	984.0	0.96	799.0	0.782
J162737+121606	65.2	0.888	71.2	0.955	56.8	0.80	39.7	0.631
J172807+121539	96.2	0.882	97.6	0.853	70.7	0.66	61.0	0.540
J194133+121001	126.0	0.892	136.7	0.943	104.6	0.78	88.5	0.648
J200651+120023	45.6	0.394	48.0	0.470	58.3	0.65	72.9	0.773

Таблица 3. Плотности потоков источников в обзоре N6 по одновременным наблюдениям в четырех рупорах, вынесенных из фокуса на $\Delta X = -138$ мм, -46 мм, $+46$ мм и $+138$ мм соответственно

NVSS name	dH	P_{-138} , mJ	P_{-46} , mJ	P_{+46} , mJ	P_{+138} , mJ	$P_{\text{mean}} \pm \sigma_P$, mJ	$\sigma_{P_{\text{rds}}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
J005146+120144	$-1'16''$	188.2	178.4	178.4	178.4	180.8 ± 4.9	0.03
J032723+120835	$+2'55''$	453.7	452.2	449.6	462.0	454.4 ± 5.4	0.01
J072832+121010	$-3'08''$	348.7	312.6	319.2	326.3	326.7 ± 15.6	0.05
J100252+121614	$-0'55''$	247.5	233.0	231.8	235.0	236.9 ± 7.2	0.03
J132748+121322	$-4'18''$	121.3	106.4	117.1	116.5	115.3 ± 6.3	0.05
J132754+122311	$+5'31''$	286.5	278.7	296.0	302.7	291.0 ± 10.5	0.03
J162737+121606	$+2'30''$	206.8	210.4	207.3	184.6	202.3 ± 11.8	0.06
J172807+121539	$+3'59''$	307.2	322.9	313.5	331.5	318.8 ± 10.6	0.03
J194133+121001	$+2'43''$	399.1	409.1	391.0	400.8	400.0 ± 7.4	0.02
J200651+120023	$-6'10''$	326.0	288.2	264.1	276.8	288.8 ± 26.1	0.09

источник проходит через вынесенные из фокуса рупора практически одновременно, плотности потоков, полученные для каждого из рупоров, должны совпадать.

Список источников, которые использовались для проверки метода, представлен в колонке 1 таблиц 2 и 3. В таблице 2 (колонки 2, 4, 6, 8) приведены значения антенных температур источников: $(T_a)_{-138}$, $(T_a)_{-46}$, $(T_a)_{+46}$, $(T_a)_{+138}$. Антенные температуры получены из кривых прохождения радиоисточников при наблюдении их в рупорах, вынесенных из фокуса вдоль фокальной линии на $\Delta X = \pm 138$ мм и $\Delta X = \pm 46$ мм. В колонках 3, 5, 7, 9 приводятся рассчитанные при тех же выно-

сах величины максимумов ДН в сечениях, удаленных от центрального на величину dH : $(F_{\max})_{-138}$, $(F_{\max})_{-46}$, $(F_{\max})_{+46}$, $(F_{\max})_{+138}$. Величины dH приведены в таблице 3 (колонка 2). Опорный источник, на который была сфокусирована антенна в обзоре N6, — J134733+121724 — отмечен в таблице 2 звездочкой (*).

Результаты оценки плотностей потоков радиоисточников этой выборки приведены в таблице 3. Для оценки использовались величины параметров, приведенные в таблице 2, и формула (7). Плотность потока опорного источника J134733+121724 равняется $P^0 = 3000$ мЯн.

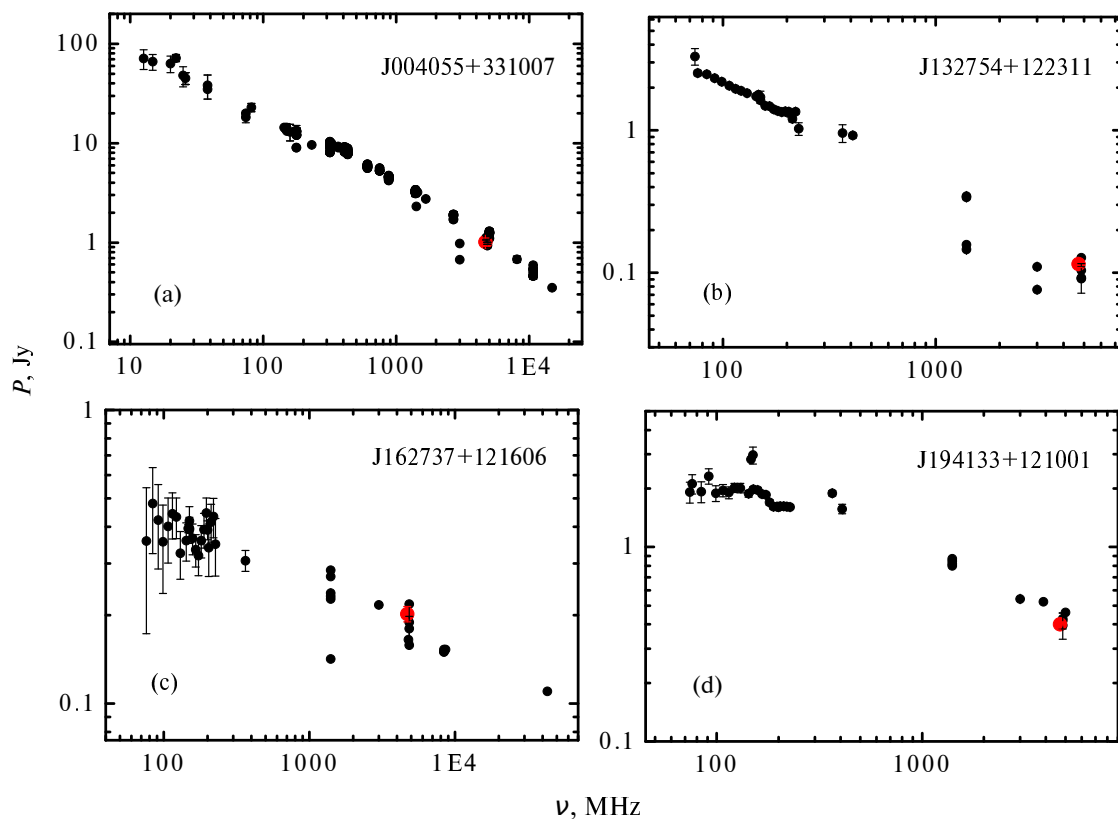


Рис. 11. Спектры источников J132754+122311, J162737+121606, J194133+121001 из таблицы 3 и источника J004055+331007 по данным CATS (Verkhodanov et al., 1993; 2005) показаны черными кружками. Красные кружки — плотности потоков, полученные по описанной выше методике.

В таблице 3 (колонки 3–6) приведены значения P_{-138} , P_{-46} , P_{+46} , P_{+138} плотностей потоков источников при выносах первичного облучателя из фокуса на величины $\Delta X = \pm 138$ мм и ± 46 мм. В колонке 7 даны средние величины плотностей потоков источников с ошибками их определения $P_{\text{mean}} \pm \sigma_P$, в колонке 8 — относительные среднеквадратичные ошибки определения потоков $rds = \sigma_P / P_{\text{mean}}$.

Среднее значение относительной среднеквадратичной ошибки определения плотностей потоков по всей выборке источников, приведенных в таблице 3, составило 0.04. Лишь для одного источника оно равно 0.09, для остальных $rds \leq 0.06$. Учитывая также, что среднее значение отношения $HPBW_{\text{exp}} / HPBW_{\text{cal}}$ составило 1.06 ± 0.05 , можно утверждать, что расчет диаграммы направленности и кривых прохождения источников в режиме работы РАТАН-600 с Западным сектором дает достаточно точные результаты.

В качестве примера на рис. 11 приведены спектры источников J132754+122311, J162737+121606, J194133+121001 из таблицы 3 и источника J004055+331007, построенные по данным системы

поддержки астрофизических каталогов CATS³ (Verkhodanov et al., 1993, 2005) (черные кружки). Там же красными кружками обозначены плотности потоков, полученные по описанной выше методике. Источник J004055+331007 наблюдался в обзоре N1 при выносах первичных облучателей из фокуса $\Delta X = 0, \pm 92$ мм. Полученные величины плотностей потоков хорошо ложатся на спектры источников, представленные на рис. 11 как для слабых, так и для сильных объектов (плотности потоков на частоте 7.4 ГГц лежат в диапазоне от 100 мЯн до 1 Ян). Аналогичная картина наблюдалась и для остальных источников из таблицы 3.

Следует подчеркнуть, что предложенный способ определения плотностей потоков источников работает, если опорный источник, на который сфокусирована антенна, является точечным и неперемежным. Если эти условия не выполняются, для оценки плотностей потоков радиоисточников обзора можно использовать точечный неперемежный источник с хорошо известной плотностью потока, проходящий на расстоянии dH от центрального

³CATS Database—Astrophysical CAtalogs support System (<https://www.sao.ru/cats>, https://www.sao.ru/cats/doc/CATS_descr.html)

сечения ДН в этом обзоре. При этом чем ярче объект и меньше величина dH , тем точнее оценка. Используя величины антенных температур этого источника при прохождении в отдельных рупорах, расчетные значения F_{\max} ДН и плотность потока радиоисточника на частоте обзора, можно оценить величины плотностей потоков источников, прошедших через ДН и зарегистрированных в процессе обзоров. Точность определения плотностей потоков таким способом составила порядка 4–5%.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты расчета ДН в режиме работы радиотелескопа РАТАН-600 с Западным сектором. Этот режим используется в настоящее время при проведении обзоров на РАТАН-600. В расчетах учитывались особенности антенной системы в этом режиме работы: использование вторичного зеркала увеличенных размеров, асимметричное облучение главного зеркала, а также поперечные выносы первичных облучателей из фокуса.

Рассчитаны кривые прохождения источников через ДН, чьи склонения отличались от склонения источника, на который была сфокусирована антенна. Проведено сравнение с экспериментальными кривыми прохождения путем их наложения. Сделаны количественные оценки полуширин кривых прохождения, полученных в результате наблюдений $HPBW_{\text{exp}}$, и полуширин расчетных кривых прохождения $HPBW_{\text{cal}}$, проведено их сравнение. Оценено среднее значение отношения $HPBW_{\text{exp}}/HPBW_{\text{cal}}$ по выборке из $n \sim 40$ источников, которое составило 1.06 ± 0.05 .

Проведено сравнение характеристик кривых прохождения при наблюдениях на Северном и Западном секторах РАТАН-600. Рассчитаны зависимости:

- 1) максимума сигнала (F_{\max}) при прохождении источника на расстоянии dH от центрального сечения антенны от величины dH ;
- 2) полуширины кривой прохождения $HPBW$ от dH ;
- 3) произведения $F_{\max} \times HPBW$ от dH при различных выносах первичного облучателя из фокуса.

Наибольшие различия в поведении этих зависимостей при работе с Северным и Западным секторами имеют место при наблюдениях с вынесенными из фокуса рупорами. Максимумы зависимостей $F_{\max}(dH)$, $F_{\max} \times HPBW(dH)$ и минимумы зависимости $HPBW(dH)$ в режиме работы с Западным сектором показывают существенное смещение по dH , и тем большее, чем больше вынос рупора из фокуса.

Предложен способ определения плотностей потоков источников, проходящих через ДН вне ее центрального сечения, с использованием расчетных значений максимумов ДН $F_{\max}(dH)$ в этих сечениях и величин антенных температур T_a на записях кривых прохождения этих источников. При этом используются также величины плотностей потоков радиоисточников, на которые сфокусирована антенна, их расчетные значения F_{\max}^0 и экспериментальные значения T_a^0 . Проверка этого метода на источниках, наблюдавшихся в обзоре №6 (частично в обзоре №1), показала, что относительная среднеквадратичная ошибка определения плотностей потоков в рупорах, через которые одновременно проходил источник, составила 4%. Учитывая, что ошибки определения полуширин кривых прохождения в среднем составили 6%, можно утверждать, что расчет ДН и кривых прохождения источников в режиме работы РАТАН-600 с Западным сектором дает достаточно точные результаты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Часть наблюдательных данных получена на уникальной научной установке радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН. Обработка наблюдательных данных выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003). При построении радиоспектров использовалась база данных радиоастрономических каталогов CATS (<https://www.sao.ru/cats/>, https://www.sao.ru/cats/doc/CATS_descr.html). В работе применялась система обработки радиоастрономических данных FADPS.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. R. Amirkhanian, A. G. Gorshkov, and A. V. Ipatov, *Soobshcheniya Spets. Astrof. Obs.* **58**, 41 (1988).
2. V. R. Amirkhanyan, A. G. Gorshkov, A. A. Kapustkin, et al., *Sov. Astron. Lett.* **18**, 157 (1992).
3. N. N. Bursov, Y. N. Pariiskii, E. K. Maiorova, et al., *Astronomy Reports* **51** (3), 197 (2007).
4. N. A. Esepkina, N. S. Bakhvalov, B. A. Vasil'ev, et al., *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **11**, 182 (1979a).

5. N. A. Esepkina, N. S. Bakhvalov, B. A. Vasilev, et al., *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **12**, 106 (1980).
6. N. A. Esepkina, N. S. Bakhvalov, B. A. Vasil'ev, et al., *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **15**, 151 (1982).
7. N. A. Esepkina, D. V. Korol'kov, and Y. N. Parijskij, *Radiotelesopes and radiometers* (Nauka, Moscow, 1973) [in Russian].
8. N. A. Esepkina, B. A. Vasil'ev, I. A. Vodovatov, and M. G. Vysotskij, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **11**, 197 (1979b).
9. S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovskii, I. N. Pariiskii, and N. A. Esepkina, *Izvestiya Glavnoj Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove* **188**, 3 (1972).
10. A. N. Korzhavin, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **11**, 170 (1979).
11. A. A. Kudryashova, N. N. Bursov, and S. A. Trushkin, in *Proc. All-Russian Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations—2022, Nizhny Arkhyz, Russia, 2022*, <https://pos.sissa.it/425/018/pdf>.
12. M. G. Larionov, *Catalogue of radio sources Zelenchuk sky survey in the range declinations 0°–14°, (Izdatel'stvo Moscow University, Moscow, 1989)*.
13. E. K. Majorova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 78 (2002).
14. E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **65** (2), 196 (2010).
15. E. K. Majorova and N. N. Bursov, *Astrophysical Bulletin* **62** (4), 378 (2007).
16. E. K. Majorova and S. A. Trushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 89 (2002).
17. M. G. Mingaliev, O. V. Verkhodanov, and A. R. Khabrakhmanov, *Pis'ma Astron. Zh.* **17**, 787 (1991).
18. Y. N. Parijskij and D. V. Korol'kov, *Itogi Nauki i tekhniki. Astrophizika i kosmicheskaya fizika* **31**, 73 (1986).
19. N. S. Soboleva, N. N. Bursov, and A. V. Temirova, *Astronomy Reports* **50** (5), 341 (2006).
20. N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **65** (1), 42 (2010).
21. A. V. Temirova, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **17**, 131 (1983).
22. A. V. Temirova, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **19**, 101 (1985).
23. S. A. Trushkin, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **11** (3), 225 (1996).
24. S. A. Trushkin, S. N. Fabrika, P. G. Tsybulev, and N. A. Nizhelskij, in *Proc. Int. Conf. on SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), Russia, 2017*, Ed. by V. V. Sokolov, T. N. Sokolova, V. B. Petkov, V. V. Sinev, E. A. Gorbacheva (INR RAS, Moscow, 2018), pp. 211–216.
25. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
26. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).
27. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).

RATAN-600 Beam Pattern and Drift Scans of Radio Sources in the Radio-Telescope Operation Mode with the West Sector

E. K. Majorova¹, N. N. Bursov¹, S. A. Trushkin¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The paper presents results of calculating the RATAN-600 beam pattern (BP) and BP drift scans of point radio sources in the West-Sector radio telescope operation mode at a frequency of 4.7 GHz. When calculating the BP, the properties of the radio telescope antenna system in this operation mode were taken into account: the use of a large secondary mirror, asymmetric radiation of the primary mirror, and the location of the primary feeds (feed horns) along the focal line of the secondary mirror. The shape of the calculated drift scans of sources through the BP is compared with that of the experimental drift scans of sources obtained from observations in the West Sector. The main characteristics of the drift scans are calculated and compared when the radio telescope operates with the West and North Sectors. A new method for determination of flux densities of sources passing through the BP outside its central cross-section is proposed, and its accuracy is estimated.

Keywords: *radio astronomy—radio telescopes*