

## МЕТОД «ЭСТАФЕТЫ»

*О. А. Голубчина, Г. С. Голубчин*

Рассмотрена возможность наблюдения на РАТАН-600 методом «эстафеты», т. е. наблюдения с уменьшенной апертурой при практически неподвижном вторичном отражателе, расположенном в центре или вблизи центра круга.

Наблюдения методом «эстафета» позволяют получать двумерные изображения радиообъектов, следить за динамикой развития сильных быстропеременных источников, измерять распределения яркости протяженных источников. Приведены некоторые расчетные и экспериментальные данные.

A possibility of observation with RATAN-600 by the relay-race method, i. e. the observation with the decreased aperture without moving the secondary mirror placed in the centre or near the centre of the circle is considered.

The observations by the relay-race method allow to obtain two-dimensional radio images, to follow the development of powerful rapid variable sources, to measure the brightness distribution of extended sources. Some data of calculations and experiments are given.

Построение двумерного изображения радиообъекта является одной из актуальных задач радиоастрономии. На одномерных инструментах типа двухэлементного интерферометра построение двумерного радиоизображения осуществляется при вращении базы по азимуту. На антеннах типа АПП (БПР и РАТАН-600), которые являются одномерными инструментами с ножевой диаграммой направленности, двумерное изображение радиообъекта можно получить, используя суточное вращение неба при наблюдении в различных азимутах [1—4].

Расчлененность главного отражателя радиотелескопа РАТАН-600 дает возможность использовать различные комбинации установки системы главного зеркала—вторичный отражатель—облучатель [3]. Для построения двумерного изображения наиболее простыми в техническом осуществлении являются:

1) наблюдения радиообъекта при положении вторичного отражателя на радиальных рельсовых путях, расположенных с дискретом  $30^\circ$  по азимуту (без перископа);

2) наблюдения радиообъекта в области  $\pm 30^\circ$  от Юга при использовании перископа и круговых путей [5];

3) наблюдения радиообъекта с уменьшенной апертурой при положении вторичного отражателя на поворотном круге в центре исходной окружности с использованием вращения поворотного круга в соответствии с изменением азимута источника [5].

Для построения двумерного изображения источника радиоизлучения, а также для длительного сопровождения источника на небе был рассмотрен вариант наблюдений с уменьшенной апертурой (п. 3). В отличие от рассмотренного режима в данной работе предлагается обеспечить возможность длительного сопровождения источника радиоизлучения при помощи перемещения только лишь элементов главного зеркала при неподвижном вторичном отражателе, расположенном вблизи центра (или в центре) исходной окружности. Максимальное количество перемещений вторичного отражателя с одного азимутального направления на другое, необходимое для

слежения за источником во все время пребывания его на небе, равно двум-трем.

При сопровождении источника радиоизлучения одни щиты выходят из состава отражающих элементов, которые формируют рабочую часть антенны, а другие присоединяются к ней таким образом, что дуга эллипса, являющаяся профилем отражающей поверхности, как бы бежит по кольцу, т. е. происходит эстафетная передача включения каждого последующего отражающего элемента.

Сечение отражающей поверхности АПП представляет собой дугу эллипса с радиусом кривизны

$$\rho = P/(1 + \cos h \cos \psi), \quad (1)$$

где  $P$  — параметр эллипса;  $h$  — высота наблюдаемого радиоисточника;  $\psi$  — азимутальный угол центра поверхности отражающего элемента. Как показано в [6], максимальный рабочий угол, т. е. максимальная протяженность горизонтальной апертуры при заданном максимальном радиальном смещении ( $l_{\max}$ ) отражающих элементов получается, если параметр эллипса определяется по формуле

$$P = 1 - \sqrt{1 - r_{\min}^2} \cos h, \quad (2)$$

где  $r_{\min} = R - l_{\max}$ .

При неизменном положении вторичного отражателя в центре круга (п. 3) параметр эллипса равен

$$P = R(1 + \cos h), \quad (3)$$

где  $R$  — радиус исходной окружности АПП.

Таким образом, традиционный для АПП метод расчета установки антенны позволяет перейти от наблюдений в режиме одноразового прохождения источника через диаграмму направленности телескопа с максимальной протяженностью апертуры к непрерывным наблюдениям с уменьшенной протяженностью апертуры при положении вторичного отражателя в центре исходной окружности на вращающемся по азимуту поворотном круге. Следует отметить, что этот вариант наблюдения с уменьшенной апертурой (п. 3) технически осложнен необходимостью равномерного вращения поворотного круга по азимуту. Кроме того, длительное пребывание вторичного отражателя на поворотном круге является нежелательным, так как оно ограничивает свободу перемещения других вторичных отражателей по наблюдательной площадке.

Поэтому было решено отказаться от приведенного выше традиционного метода расчета установки антенны [6] и воспользоваться методикой расчета установки отражающих элементов главного зеркала антенны при радиоастрономической юстировке [7, 8], на которой основан метод «эстафеты».

Существенными отличиями метода «эстафеты» от наблюдений по п. 3 являются следующие:

- положение вторичного отражателя задается наблюдателем в произвольной точке вблизи центра;
- отсутствует необходимое равномерное азимутальное вращение поворотного круга, на котором расположен вторичный отражатель.

При расчете таблиц установки отражающих элементов для наблюдений методом «эстафета» непосредственно использовались модификации рабочих программ радиоастрономической юстировки [9].

Входными параметрами программы являются:

- $r$  — положение облучателя;
- $l_{\text{оп}}$  — положение опорного отражающего элемента по радиальному перемещению;
- $t_{\text{н}}$  — момент наблюдения;

—  $N_1, N_2, \dots, N_n$  — номера элементов, формирующих отражающую поверхность на данный момент наблюдения;

—  $M_1, M_2, \dots, M_n$  — некоторые данные из астрономического ежегодника, позволяющие рассчитывать эфемериды источника на заданный момент времени наблюдения.

При этом угловые координаты каждого отражающего элемента  $(\alpha, \beta)$  рассчитываются по обычным формулам [6]. Радиальные координаты отражающих элементов рассчитываются так, чтобы радиоволны, отраженные от поверхности каждого щита работающей части антенны и собирающиеся в ее фокусе, были синфазны с сигналом, отраженным поверхностью заданного опорного элемента. Опорный элемент, как правило, выбирается ближайшим к центральному элементу работающей части антенны.

Радиальное положение каждого отражающего элемента определяется при решении системы уравнений [7, 8]

$$\begin{aligned} \Delta r_{\text{оп}} &= \Delta r_1; \\ \Delta r_{\text{оп}} &= \Delta r_2; \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta r_{\text{оп}} &= \Delta r_n, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta r_1$  — оптический путь луча от фронта падающей волны до фокуса после отражения луча от центра поверхности опорного щита;  $\Delta r_n$  — от центра поверхности элемента с текущим номером  $n$ ;

$$\begin{aligned} \Delta r &= (R_1 - l) \cos h(t) \cos (A_A - a(t) - \varphi) + \\ &+ \sqrt{(R_1 - l)^2 + r^2 - 2(R_1 - l)r \cos \varphi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l = l_{\text{оп}}$ ;  $h(t)$ ,  $a(t)$  — высота и азимут наблюдаемого источника;  $A_A$  — ориентация вторичного отражателя по азимуту;  $\varphi$  — азимутальный угол отражающего элемента из центра антенны.

Значения радиальных координат  $l_1, l_2, \dots, l_n$  остальных элементов рабочей части антенны определяются решением системы уравнений (4), каждое из которых имеет вид (5) и решается методом последовательных приближений [7]. Максимальная протяженность апертуры при этом методе наблюдения достигается выбором оптимального положения опорного элемента. Так как возможность перемещения щита по радиусу ограничена максимальным и минимальным значениями радиусов некоторых заданных окружностей ( $R_{\text{max}} - R_{\text{min}} = 1$  м), то необходимо, чтобы кривизна эллипса, дуга которого представляет собой профиль отражающей поверхности антенны, была не слишком большой. Это достигается при значении  $l_{\text{оп}}$ , близком к положению окружности с минимальным радиусом. Фактически при построении отражающей поверхности для наблюдений методом «эстафета» был осуществлен переход от расчета установки антенны с минимальной горизонтальной протяженностью апертуры (один отражающий элемент) к апертуре с максимально возможной протяженностью. При традиционном методе расчета установки происходит обратное.

Заметим, что определение радиальных координат отражающих элементов по формулам (4) может быть целесообразным для расчета установки АПП с зонированием. В этом случае уравнения (4) принимают вид:

$$\Delta r_{\text{оп}} = \Delta r_1 + n\lambda,$$

где коэффициент  $n = 1, 2, 3, \dots$  равен числу зон.

Общее возможное время наблюдения источников радиоизлучения методом «эстафета» составляет  $\Delta T \approx 15^{\text{h}}$  для источников с  $\delta \approx 23^\circ$  и  $\Delta T \approx 10^{\text{h}}$  при  $\delta \approx -14^\circ$ , в то время как продолжительность сопровождения радиоисточников при наблюдении на Юге с перископом существенно меньше и составляет  $T = 3^{\text{h}} \div 4^{\text{h}}$  [10].

Сканирование радиообъекта диаграммой направленности происходит в секторе позиционных углов  $q$ , определяемых по формуле [2]

$$q = \arcsin [(\cos \varphi / \cos \delta) \sin A], \quad (6)$$

где  $\varphi$  — широта места наблюдения;  $\delta$ ,  $A$  — склонение и азимут наблюдаемого источника.

Так, в случае наблюдений Солнца методом «эстафеты» при  $\delta_{\odot} \approx -14^{\circ}$  ( $\varphi \approx 45^{\circ}$ ) величина максимально возможного сектора позиционных углов  $2q$  равна  $82^{\circ}$ , а для источников с  $\delta_{\odot} \approx 23^{\circ}$  получаем  $2q \approx 90^{\circ}$ . Таким образом достигается довольно высокое заполнение  $UV$ -плоскости, а сам метод «эстафеты» оказывается достаточно эффективным для построения двумерной карты радиоизлучения Солнца.

ТАБЛИЦА 1

$h$	$13^{\circ}$	$52^{\circ}$	$65^{\circ}$	$69^{\circ}$
$\Delta t$ , мин	27	20	10	8

Примечание. Расчет выполнен для группы щитов, состоящей из  $N = 25$  элементов.

В автоматическом режиме работы РАТАН-600 метод «эстафеты» позволяет проводить многократные наблюдения в течение некоторого промежутка времени  $\Delta t$  на одной и той же рабочей части антенны при соответствующей корректировке положения отражающих элементов по всем трем координатам, не используя эстафетное перемещение профиля главного зеркала по кольцу. Очевидно, что это время  $\Delta t$  есть функция высоты наблюдаемого радиоисточника; соответствующие расчеты показали, что  $\Delta t \approx 8 \div 30$  мин (табл. 1).\*

Перестановки рабочей части антенны в автоматическом режиме практически можно осуществлять с временным интервалом  $\Delta \tau$ , который определяется временем прохождения наблюдаемого радиоисточника через неподвижную диаграмму направленности этой части антенны:

$$\Delta \tau = \theta / \rho \omega + \Delta, \quad (7)$$

где  $\theta$  — угловой размер источника радиоизлучения;  $\rho$  — угловое разрешение антенны;  $\omega$  — угловая скорость движения источника;  $\Delta$  — некоторый запас времени для регистрации боковых лепестков диаграммы антенны, близких к ее главному лепестку. Этот промежуток времени для сильных дискретных радиоисточников составляет  $\Delta \tau \approx 1$  мин, а для Солнца  $\Delta \tau \approx 4$  мин.

Длительное сопровождение источника радиоизлучения при его наблюдении на АПП методом «эстафеты» достигается ценой существенной потери площади и разрешающей способности телескопа (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

$h$	$13^{\circ}$	$24^{\circ}$	$35^{\circ}$	$52^{\circ}$	$65^{\circ}$	$67^{\circ}$	$68^{\circ}$	$69^{\circ}$
$\Sigma N$	32	33	34	37	42	43	44	46

Примечание.  $h$  — высота наблюдаемого источника;  $\Sigma N$  — количество выставленных отражающих элементов рабочей части антенны.

\* Все расчеты выполнены для реальных наблюдений на РАТАН-600 в режиме «эстафеты» при использовании модификации программ расчета радиоастрономических юстировок.

Из табл. 2 видно, что при ширине отражающего элемента главного зеркала РАТАН-600, равной 2.2 м, апертура ( $D$ ) антенны при наблюдении методом «эстафета» меняется в зависимости от высоты от  $D \approx 64$  м ( $h \approx 35^\circ$ ) до  $D = 92$  м ( $h \approx 69^\circ$ ).

Разрешающая способность ( $\rho$ ) рабочей части антенны при наблюдении на различных длинах волн приведена в табл. 3

ТАБЛИЦА 3

$\lambda$ , см	0.8	1.35	2.0	2.7	4
$\rho' (D = 75 \text{ м})$	0.37	0.62	0.92	1.24	1.84
$\rho' (D = 100 \text{ м})$	0.27	0.46	0.68	0.92	1.36

Следует отметить, что антенна, работающая в режиме «эстафеты», является длиннофокусной системой, в которой отсутствует паразитная поляризация, а продольная и поперечная безаберрационная зоны составляют десятки длин волн; диаграмма направленности антенны близка к ножевой [2].

Отсутствие паразитной поляризации и искажающего влияния аберрации существенно для решения ряда астрофизических задач (исследование динамики радиоизлучения локальных областей на Солнце, исследование распределения радиояркости по диску Солнца и т. д.).

Использование РАТАН-600 в режиме «эстафеты» может быть полезным и для интерферометрии со сверхдлинными базами. В этом случае геометрическая площадь рабочей части антенны АПП равна  $S \approx 400 \text{ м}^2$  для источников с  $h \approx 30 \div 35^\circ$  и  $S \approx 560 \text{ м}^2$  для источников с  $h \approx 69^\circ$ , что соответствует геометрической площади параболоидов с диаметрами 22 и 25 м.

**Эксперимент.** Первые попытки осуществить наблюдения радиоизлучения Солнца методом «эстафеты» были предприняты нами в 1977 г. Эксперименты показали принципиальную возможность использования этого метода для картографирования радиообъекта и слежения за динамикой развития сильных быстропеременных радиоисточников.

9—10.02.80 на РАТАН-600 успешно проведены наблюдения радиоизлучения Солнца на  $\lambda = 2.3$  см методом «эстафеты» в 14 и 18 азимутах с хорошим качеством записи (рис. 1). Протяженность апертуры составляла  $D \approx 64$  м, разрешение  $\rho \approx 1'$ , высота Солнца  $h \approx 30 \div 35^\circ$ , общее время наблюдений  $\Delta T \approx 6^{\text{h}}$ , изменение позиционного угла  $2q \approx 65^\circ$ . Моменты наблюдения радиоизлучения Солнца:  $t = 10 \text{ 30}, 10 \text{ 44}, 11 \text{ 07}, 11 \text{ 22}, 11 \text{ 45}, 11 \text{ 59}, 12 \text{ 20}, 12 \text{ 34}, 12 \text{ 56}, 13 \text{ 10}, 13 \text{ 32}, 13 \text{ 46}, 14 \text{ 11}, 14 \text{ 25}, 15 \text{ 39}, 15 \text{ 53}, 16 \text{ 27}, 16^{\text{h}} 47^{\text{min}}$ .

Одновременно осуществлялась синхронная запись наблюдений на МЛ с помощью ЭВМ «Электроника К-200».

В качестве примера на рис. 2 представлена оптическая карта Солнца на 10.02.80. Пятно с максимальной площадью  $S = 683$  м.д.п. группы пятен  $N = 54$  имеет гелиографические координаты  $\varphi = -15^\circ.5$ ,  $\lambda = 205^\circ.5$ . Наблюдения, проведенные на РАТАН-600 на  $\lambda = 2.3$  см методом «эстафеты» на моменты  $t_1 = 10^{\text{h}} 44^{\text{min}}$ ,  $t_2 = 13^{\text{h}} 46^{\text{min}}$ ,  $t_3 = 16^{\text{h}} 47^{\text{min}}$ , позволили определить положение локального источника радиоизлучения по двум координатам:  $\lambda = 222^\circ$ ,  $\varphi = -16^\circ$  (рис. 2).

Таким образом, локальный источник радиоизлучения расположен по радиусу над оптическим пятном группы № 54.

Результаты проведенных наблюдений будут представлены в отдельной работе.

**Заключение.** Разработан метод «эстафеты» — один из возможных режимов наблюдений на РАТАН-600 с уменьшенной апертурой при по-

ложении вторичного отражателя вблизи центра (или в центре) круга, что позволяет получать двумерное изображение радиисточника и сопровождать наблюдаемый источник радиоизлучения практически во все время пребывания его на небе.

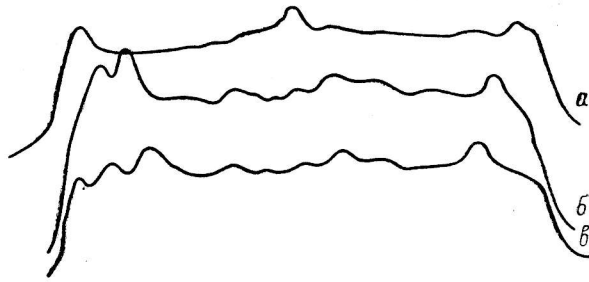


Рис. 1. Копии записей прохождения Солнца через диаграмму направленности РАТАН-600 при наблюдении 10.02.80 методом «эстафеты» в моменты времени  $t$ : а — 10 44; б — 12 56; в — 13<sup>h</sup>46<sup>min</sup>.

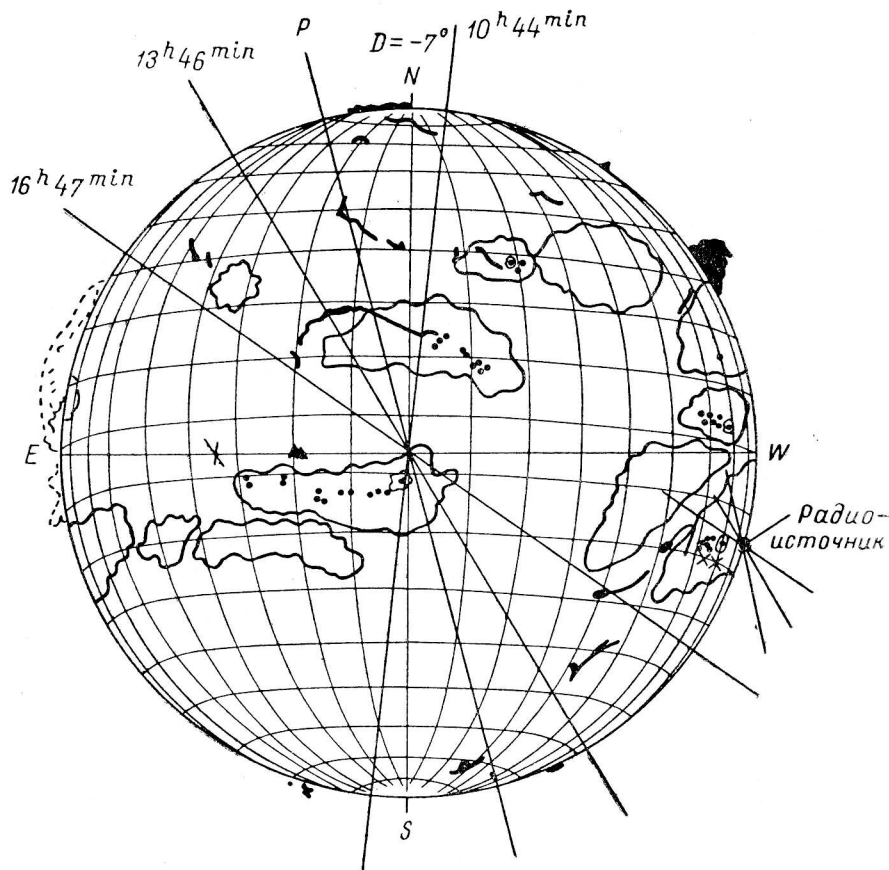


Рис. 2. Оптическая карта Солнца.

Положение радиисточника получено из трех прохождений Солнца через диаграмму направленности антенны при наблюдении методом «эстафеты» в моменты времени  $t_n = 10\ 44, 13\ 46, 16^h\ 47^{\text{min}}$ .

Приведенные оценки зависимости количества выставляемых элементов от высоты наблюдаемых источников показали, что протяженность апертуры при наблюдении методом «эстафеты» лежит в пределах  $D \approx 70 \div 100$  м.

Полное время наблюдений для источников с  $\delta \approx 23^\circ$  составляет  $\Delta T \approx 15^h$ , а для источников с  $\delta \approx -14^\circ$ ,  $\Delta T \approx 10^h$ . Время, возможное для наблюдений

на одной группе без эстафетного включения последующих отражающих элементов, является функцией высоты и составляет  $\Delta t \approx 30 \div 8$  мин для высот  $h \approx 13 \div 69^\circ$  соответственно. Сканирование радиообъекта диаграммой направленности возможно в секторе позиционных углов  $2q \approx 82 \div 90^\circ$  для источников с  $\delta \approx -14 \div +23^\circ$ .

9—10.02.80 на РАТАН-600 проведены наблюдения Солнца методом «эстафеты» в 14 и 18 азимутах. Наблюдения показали эффективность метода «эстафеты» для построения двумерного радиоизображения Солнца.

В заключение авторы благодарят Ю. П. Коровяковского за предоставленную возможность работы на ЭВМ «М-222», за безотказную помощь при проведении трудоемких вычислений. Авторы признательны В. М. Боду за предоставленную аппаратуру и помощь при проведении эксперимента.

#### Список литературы

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973.
2. Парийский Ю. Н., Хайкин С. Э. О требованиях, которые должны быть предъявлены к большим радиотелескопам с точки зрения задач радиоастрономии. — Изв. ГАО, 1960, № 164, с. 27.
3. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 13.
4. Кайдановский Н. Л. Формирование многолучевых диаграмм направленности у антенн переменного профиля (АПП). — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, № 7, с. 207.
5. Кайдановский Н. Л. Сопровождение источников радиоизлучения при наблюдениях с помощью антенны переменного профиля (АПП). — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, № 7, с. 214.
6. Хайкин С. Э., Кайдановский Н. Л., Есепкина Н. А., Шиврис О. Н. Большой Пулковский радиотелескоп. — Изв. ГАО, 1960, № 164, с. 3.
7. Гельфрейх Г. Б., Голубчина О. А. Исследование и юстировка Большого пулковского радиотелескопа радиоастрономическим способом. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1972, № 4, с. 177.
8. Голубчина О. А. Использование радиоизлучения Луны и дискретных источников для юстировки антенны переменного профиля. — XV Всесоюзная радиоастрономическая конференция по аппаратуре, антеннам и методам. Тезисы докладов. Ереван, 1978.
9. Гельфрейх Г. Б., Голубчина О. А. Радиоастрономическая юстировка РАТАН-600. — Сообщения САО, 1978, 23, с. 5.
10. Голубчин Г. С. Система автоматизированного управления элементами кругового и плоского отражателей антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1975, № 7, с. 226.