

МЕТОД «ЭСТАФЕТЫ С ЗОНИРОВАНИЕМ»

О. А. Голубчина

Статья посвящена разработке нового режима наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 — методу «эстафеты с зонированием». Оценены геометрические площади рабочей части антенны, угловые разрешения в горизонтальном направлении, допустимые полосы частот радиометров и изменение чувствительности системы радиотелескоп—радиометр при переходе от обычного режима наблюдений на РАТАН-600 к наблюдениям методом «эстафеты с зонированием».

The paper is devoted to the elaboration of the new regime of observations at the radio telescope RATAN-600, to the method «estafette with zoning». Geometrical areas of the working part of the antenna, angular resolutions in horizontal direction, possible frequency bands of radiometers and the sensitivity variations of the system radio telescope—radiometer at the transition from the usual regime of observations with the RATAN-600 to the observations by «estafette with zoning» method are estimated.

Современный уровень экспериментальной радиоастрономии требует от радиотелескопов высокого углового разрешения и способности сопровождать или следить за космическими источниками радиоизлучения. В последние годы в практике наблюдений РАТАН-600 нашел применение новый способ — метод «эстафеты». Стремление увеличить угловое разрешение телескопа в горизонтальном направлении и получить возможность следить за развитием космических источников привело к разработке нового метода наблюдений на РАТАН-600 — метода «эстафеты с зонированием».

Напомним, что отражающие элементы главного зеркала антенны РАТАН-600 имеют три степени свободы перемещения: азимутальное, угломестное и радиальное [1]. Диапазоны допустимых перемещений отражающих элементов по углу места составляют $\Delta\alpha = 0 \div 53^\circ$, по азимуту $\Delta\beta = \pm 6^\circ$, по радиусу $\Delta l = \pm 1$ м. Профилем главного зеркала антенны является либо парабола (при наблюдениях источников с малыми высотами), либо дуга эллипса или окружности (при наблюдениях источников со средними и большими высотами). Как показано в работе [2], апертура главного зеркала антенны при наблюдении методом «эстафеты» примерно в 4—5 раз меньше, чем при наблюдении на всем секторе в «штатном» режиме наблюдений. Это приводит к падению чувствительности радиотелескопа и ухудшению углового разрешения в горизонтальном направлении. Используя смещение отражающих элементов по радиальному направлению на величину, пропорциональную целому числу длины волн [3, 4, 5, 6], т. е. так называемое зонирование, можно существенно улучшить разрешение АПП и чувствительность системы по сравнению с наблюдениями методом «эстафеты».

Программа расчета установки отражающих элементов РАТАН-600 для наблюдений методом «эстафеты с зонированием» является модификацией программы расчета антенны при наблюдениях методом «эстафеты» [2].

Азимутальные и угломестные координаты отражающих элементов вычисляются по формулам, которые используются при расчете уставок в штатных режимах наблюдений на АПП [3].

Радиальные координаты определяются из системы уравнений методом последовательных приближений [2, 5]:

$$\begin{aligned}\Delta r_{\text{оп}} &= \Delta r_1 + k_1 \lambda; \\ \Delta r_{\text{оп}} &= \Delta r_n + k_n \lambda;\end{aligned}\quad (1)$$

$$\Delta r = (R_1 - l) \cosh(t) \cos(A_A - a(t) - \varphi) + \sqrt{(R_1 - l)^2 + r^2 - 2(R_1 - l)r \cos \varphi}, \quad (2)$$

где n — текущий номер отражающего элемента; k — целое число полных периодов электромагнитной волны: $k=0, 1, 2, \dots$; λ — длина волны наблюдения; $\Delta r_{\text{оп}}$ — оптический путь луча от фронта падающей волны до фокуса антенны после отражения луча от поверхности опорного элемента; Δr_n — от элемента с текущим номером n .

При наблюдениях в режиме «эстафеты с зонированием» возможны два варианта расчета установок антенны: 1 — используется весь диапазон возможных перемещений отражающих элементов по радиусу ($\Delta l=1000$ мм); 2 — используется уменьшенный диапазон радиальных перемещений, который задается наблюдателем.

При расчете радиальных координат на ЭВМ в соответствии с вариантом 1 задаются и вводятся с перфокарт следующие данные:

а) положение опорного отражающего элемента по радиусу ($l_{\text{оп}}$), относительно которого рассчитываются радиальные координаты остальных элементов рабочей части антенны;

б) верхняя граница (kR , $kR < 1$ м) возможных радиальных перемещений элементов при строго постоянной нижней границе, соответствующей окружности с минимальным радиусом. В этом случае радиальные перемещения отражающих элементов возможны в пределах $1000-kR$.

При расчете антенны в соответствии с вариантом 2 задаются:

а) положение опорного отражающего элемента по радиусу ($l_{\text{оп}}$);

б) диапазон возможных радиальных перемещений ΔkR .

В этом случае радиальные перемещения элементов допустимы в интервале $l_{\text{оп}} \pm \Delta kR/2$. Очевидно, что в некоторых частных случаях эти варианты тождественны, например, при $l_{\text{оп}}=500$ мм, $kR=0$ (вариант 1) и $l_{\text{оп}}=500$ мм, $\Delta kR=1000$ мм (вариант 2).

Центральная часть антенны выставляется без зонирования подобно методу «эстафеты». Протяженность этой части антенны пропорциональна заданному диапазону радиальных перемещений. Отражающие элементы, радиальные координаты которых выходят за пределы возможных перемещений по радиусу, устанавливаются с зонированием, т. е. радиальные координаты изменяются на величину, пропорциональную целому числу длин волн. В зависимости от поставленных астрофизических задач выбираются варианты расчета и наблюдения 1 или 2.

Для обеспечения максимально возможной полосы частот радиометра необходимо использовать весь диапазон радиальных перемещений, допустимый конструктивными возможностями АПП (1 м). В этом случае целесообразно использовать вариант расчета 1, так как центральная часть антенны, максимальная по протяженности, выставляется без зонирования. Зонируются же крайние, слабо облучаемые элементы рабочей части. Для наблюдений быстрых переменных источников в узкой полосе частот радиометра целесообразно использовать вариант расчета 2. Вследствие уменьшения диапазона возможных радиальных перемещений (ΔkR) отражающих элементов, изменения радиальных координат между двумя последовательными наблюдениями незначительны, что позволяет сократить временной интервал между наблюдениями. Однако при наблюдениях с существенно уменьшенным диапазоном радиальных перемещений отражающих элементов (вариант 2) для сохранения пространственно-временной когерентности сигнала, принимаемого от космического источника, требования к полосе частот радиометра более жесткие, так как без зонирования используется лишь малая центральная часть главного зеркала АПП (ΣN_1). ΣN_2 — общее число выставляемых элементов.

О возможности наблюдений в режиме «эстафеты с зонированием» при неподвижном положении вторичного отражателя в центре поворотного круга с использованием вращения поворотного круга в соответствии с изменением азимута источника. Приведенные выше алгоритмы позволили выполнить соответствующие расчеты на ЭВМ М-4030 для оценки геометрических площадей рабочей части АПП и допустимых полос частот радиометров при наблюдении методом «эстафеты с зонированием». Расчеты сделаны для реальных наблюдений на западном секторе РАТАН-600. Анализированы возможности наблюдений источников на низких, средних (W 49) и больших высотах (ЗС-84) на $\lambda=21$ см.

В этих расчетах положение вторичного отражателя совпадает с центром круга, а его ориентация соответствует азимуту $A_A=270^\circ$. При этом рассмотрены различные комбинации положения опорного элемента по радиусу и диапазона радиальных перемещений отражающих элементов.

Для наблюдений радиосточника W 49 на антенне, рассчитанной по варианту 1, зонированные оптические пути принимаемого сигнала равны: $\Delta L=357 \div 462$ см, $l_{оп}=950$ мм ($H=3 \div 35^\circ$) и $\Delta L=504 \div 588$ см, $l_{оп}=500$ мм ($H=3 \div 35^\circ$) ($\Delta L=\lambda k_{max}$) (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1

kR , мм	$l_{оп}$, мм	Δl , мм	α	H	ΣN_1	ΣN_2	k_{max}	ΔL_{max} , см
0	950	1000	260°	3°	34	56	17	357—462
			265	8	33	57	17	
			270	13	34	59	18	
			275	18	35	59	18	
			280	23	34	60	18	
			285	27	35	61	18	
			290	32	36	64	20	
			295	35	33	66	22	
300	500	700	260	3	18	56	24	504—588
			265	8	17	56	24	
			270	13	18	58	25	
			275	18	19	56	25	
			280	23	18	60	25	
			285	27	19	61	25	
			290	32	18	64	27	
			295	35	19	66	28	

При расчете уставок по первому варианту целесообразно радиальную координату опорного элемента задавать близкой к положению окружности с минимальным радиусом, так как вписываемая в допустимый диапазон радиальных перемещений дуга эллипса, которая является профилем центральной части антенны, увеличивается с уменьшением радиуса кривизны этого эллипса. Это приводит к увеличению количества отражающих элементов, выставляемых без зонирования (ΣN_1), т. е. к уменьшению зонированного пути. В силу этого допустимая полоса частот радиометра, для которой сохраняется пространственно-временная когерентность, увеличивается.

При расчете антенны по варианту 2 уменьшение диапазона радиальных перемещений приводит к увеличению зонированного пути $\Delta L=546 \div 630$ см и, следовательно, к уменьшению допустимой полосы частот радиометра (табл. 2).

Итак, зонированная длина оптического пути принимаемого сигнала при наблюдении методом «эстафеты с зонированием» со вторичным отражателем, азимут которого $A_A=270^\circ$, расположенным неподвижно в центре круга, составляет 3.5—6.5 м при наблюдении источников радиоизлучения с высотами $H=3 \div 35^\circ$ (варианты 1 и 2).

В табл. 3 приведены результаты аналогичных расчетов (вариант 2) для источника радиоизлучения ЗС-84, высоты наблюдений которого на западном секторе меняются от 38.5° до 82.2° .

Как видно из табл. 3, при существенно уменьшенном диапазоне радиальных перемещений отражающих элементов (вариант 2), большая часть антенны зонирована, а зонированный оптический путь луча составляет 6.3—18.7 м. При наблюдении источников с высотами $\sim 82^\circ$ выставляется $\sim 1/3$ всех отражающих элементов, формирующих главное зеркало РАТАН-600.

Следует особо остановиться на вопросе, связанном с возможностями наблюдений методом «эстафеты с зонированием» при вторичном отражателе, расположенном в центре круга, с использованием его вращения в соответствии с изменением азимута наблюдаемого источника [5, 2].

Расчеты (табл. 4) выполнены по модифицированной вышеупомянутой программе, в которой для рассматриваемого режима наблюдений азимут вторич-

ТАБЛИЦА 2

$\Delta kR/2$, мм	$l_{оп}$, мм	Δl , мм	a	H	ΣN_1	ΣN_2	k_{max}	ΔL_{max} , см
150	500	300	260°	3°	12	56	26	546—630
			265	8	13	57	26	
			270	13	12	58	27	
			275	18	13	59	27	
			280	23	12	60	27	
			285	27	13	61	27	
			290	32	12	64	28	
			295	35	13	67	30	
500	500	1000	260	3	22	56	26	546—630
			265	8	23	57	26	
			275	18	23	59	27	
			285	27	23	61	27	
			295	35	25	67	30	
50	950	100	260	3	10	56	26	546—630
			265	8	11	57	26	
			270	13	10	59	27	
			275	18	12	60	27	
			290	32	10	64	28	
			295	35	11	67	30	

ТАБЛИЦА 3

$\Delta kR/2$, мм	$l_{оп}$, мм	a	H	ΣN_1	ΣN_2	k_{max}	ΔL_{max} , см
150	500	246°	38°42'	13	68	30	630—1869
		251	46 07	14	76	32	
		256	53 49	15	86	36	
		261	61 22	16	104	42	
		266	68 16	17	131	51	
		270	72 54	21	163	63	
		275	77 21	24	201	70	
		285	82 26	30	300	89	

ТАБЛИЦА 4

H	ΣN_1	ΣN_2	k_{max}	ΔL_{max} , см
3.5°	11	56	136	544
35	12	66	155	620
58	14	94	202	808
67	17	124	256	1024
69.5	19	138	285	1140
72	19	154	313	1252
75	21	184	371	1484
79	23	256	513	2052
80	25	290	587	2348
81	25	340	697	2788
83.8	29	450	775	3080

ного отражателя приравняется азимуту наблюдаемого источника, т. е. $A_A = a$. Рассмотрен широкий диапазон высот наблюдаемых источников (3.5—83.8°; 90°). В качестве одного из входных параметров программы задан «узкий» диапазон радиальных перемещений $\Delta kR/2 = 150$ мм (вариант 2 как наиболее целесообразный для наблюдений быстропеременных источников).

Из табл. 4 видно, что в том случае, когда вторичный отражатель расположен в центре поворотного круга, вращающегося в соответствии с изменением

азимута источника, для наблюдений на высотах $H=3.5 \div 83.8^\circ$ может быть использовано $\Sigma N_2=56 \div 450$ отражающих элементов, что составляет $\leq 1/2$ всех отражающих элементов главного зеркала РАТАН-600. Зонируемые оптические пути $\Delta L=5.5 \div 30$ м, а максимальные числа полных периодов электромагнитной волны при зонировании равны $k_{\max}=136 \div 770$ ($\lambda=4$ см). Для источников с $H \approx 90^\circ$ выставляются все отражающие элементы главного зеркала, и $k_{\max}=0$.

О возможностях наблюдений методом «эстафеты с зонированием» при вторичном отражателе, смещенном относительно центра поворотного круга. Как показано в работе [3], при наблюдении источников с высотами $0 < H < \pi/2$ сечение отражающей поверхности АПП представляет собой дугу эллипса, фокусное расстояние которого есть функция высоты наблюдения (H):

$$F = 1 - P/(1 + \cos H) \quad (3)$$

(P — параметр эллипса, радиус исходной окружности $R=1$).

Представляет интерес исследовать зависимость количества выставляемых отражающих элементов от высоты наблюдения (H) и заданного положения вторичного отражателя (F — фокусное расстояние эллипса).

Все вычисления выполнены на ЭВМ М-4030 и ЕС-1035 по программам расчета уставок отражающих элементов АПП в режиме наблюдений «эстафеты с зонированием».

Входными параметрами программы были высоты источников (H) и расстояния (F) вторичного отражателя от центра круга. Результаты расчетов приведены в табл. 5а, 5б, 6.

В табл. 6 представлена зависимость количества выставляемых элементов (ΣN_2) от положения ($F=0 \div 200$ м) вторичного отражателя относительно центра круга для источника с большой высотой ($H=83^\circ 49'$; $\lambda=4$ см).

Для рассматриваемого в табл. 5б диапазона высот $H=72 \div 83.8^\circ$ количество выставленных отражающих элементов практически не меняется с высотой ($F \neq 0$), в то же время значение k_{\max} существенно зависит от высоты, что следует учитывать при оценке допустимой полосы пропускания радиометра. Оптимальное положение вторичного отражателя, при котором достигается апертура антенны, близкая к максимальной для наблюдений источников с высотами $H > 72^\circ$, соответствует $F=40 \div 50$ м. При такой установке вторичного отражателя апертура рабочей части антенны $D=480 \div 570$ м, что обеспечивает на $\lambda=4$ см угловое разрешение в горизонтальном направлении $\rho \approx 14 \div 11''$ по уровню половинной мощности.

Из табл. 5, 6 следует, что каждой из рассматриваемых нами высот (H) наблюдаемого источника соответствует определенное положение вторичного отражателя $F_{\text{опт}}$, близкое к оптимальному. В табл. 7 приведены значения $F_{\text{опт}}(H)$, при которых достигается апертура антенны, близкая к максимальной, а также соответствующее угловое разрешение (ρ) для $\lambda=4$ см и допустимая полоса частот радиометра Δf .

Из приведенных результатов расчета (табл. 8) следует также, что при наличии круговых рельсовых путей, расположенных по окружности с радиусом ~ 100 м (от центра круга) и перемещения вдоль них вторичного отражателя в соответствии с изменением азимута источника достигается длительное наблюдение источников в широком диапазоне высот ($H=35 \div 70^\circ$) с высоким угловым разрешением в горизонтальном направлении ($\rho=15 \div 17''$, $\lambda=4$ см).

Так, в летнее время можно наблюдать радиоизлучение Солнца в течение 8—10 ч через короткие интервалы времени с угловым разрешением в горизонтальном направлении $\rho=15 \div 17''$, $\lambda=4$ см (по уровню 0.5 мощности), что особенно важно при изучении динамики развития активных образований на Солнце.

Оценка допустимых полос частот радиометров и чувствительности системы радиотелескоп—радиометр при наблюдении на РАТАН-600 методом «эстафеты с зонированием». При переходе от «штатного» режима наблюдений к наблюдениям методом «эстафеты с зонированием» изменяется чувствительность системы. Обозначим $(T_c/\Delta T_{\text{ш}})_1$, $(T_c/\Delta T_{\text{ш}})_2$ отношение сигнал/шум или чувствительность системы радиотелескоп—радиометр в двух режимах наблюдений соответственно.

ТАБЛИЦА 5а

Показатель	Высота источника H					$F, \text{ м}$
	$69^{\circ}5$	67°	58°	35°	$3^{\circ}5$	
ΣN_1	19	17	14	12	11	0
ΣN_2	138	124	94	66	56	
k_{max}	285	256	202	155	136	
ΣN_1	18	18	16	14	11	10
ΣN_2	154	138	102	68	58	
k_{max}	317	278	222	157	141	
ΣN_1	24	22	18	14	14	40
ΣN_2	254	244	136	82	68	
k_{max}	261	201	268	192	169	
ΣN_1	36	30	21	16	14	60
ΣN_2	390	324	180	96	76	
k_{max}	140	120	196	223	185	
ΣN_1	62	42	24	16	14	70
ΣN_2	378	378	212	106	82	
k_{max}	185	103	145	226	199	
ΣN_1	22	28	26	22	Нет расчета	100
ΣN_2	348	348	338	256		
k_{max}	85	91	65	129		
ΣN_1	17	18	26	36	—	120
ΣN_2	326	326	326	192		
k_{max}	88	91	77	82		
ΣN_1	13	15	16	43	—	140
ΣN_2	90	102	304	250		
k_{max}	68	64	75	38		
ΣN_1	12	13	15	23	—	151
ΣN_2	68	74	292	272		
k_{max}	74	76	70	71		
ΣN_1	10	10	13	19	—	160
ΣN_2	56	60	280	280		
k_{max}	55	59	49	73		

ТАБЛИЦА 5б

H	$F = 0$		$F = 30 \text{ м}$		$F = 40 \text{ м}$		$F = 50 \text{ м}$		$F = 60 \text{ м}$	
	ΣN_2	k_{max}	ΣN_2	k_{max}	ΣN_2	k_{max}	ΣN_2	k_{max}	ΣN_2	k_{max}
72°	154	313	252	261	322	193	400	112	390	93
75	184	371	360	252	410	177	400	128	390	85
77	212	423	420	355	410	191	400	103	388	68
79	256	513	420	253	410	141	398	27	390	107
80	290	587	420	208	410	147	400	99	390	109
81	340	697	420	194	410	40	400	136	390	127
83.8	450	775	420	18	410	171	400	150	390	126

ТАБЛИЦА 6

Показатель	$F, \text{ м}$														
	0	10	30	40	50	60	70	80	90	100	140	151	160	170	200
ΣN_2	451	440	420	410	400	390	378	188	138	110	52	44	38	32	20
k_{max}	775	484	18	171	150	126	133	136	119	99	63	55	57	58	30

ТАБЛИЦА 7

H	$F_{\text{онт}}, \text{м}$	ΣN_2	k_{max}	ρ	$\Delta f, \text{МГц}$
83.8°	0	450	775	11.5''	4.4
75	40	410	177	11.0	5.3
69.5	60	390	140	12.0	6.7
67	70	378	103	12.1	9.1
58	100	338	65	12.4	14.4
35	160	280	73	13.8	12.8

ТАБЛИЦА 8

H	ΣN_1	ΣN_2	k_{max}	$\Delta f, \text{МГц}$
69.5°	22	348	85	11.0
67	28	348	91	10.3
58	26	338	65	14
35	22	256	129	7

Тогда при переходе от одного метода наблюдений к другому изменение чувствительности системы равно

$$m = (T_0/\Delta T_{\text{м}})_2 / (T_0/\Delta T_{\text{м}})_1; \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{м}} = T_{\text{ш}} (\Delta f \tau)^{-1/2}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ш}} \text{К}$ — шумовая температура всей системы радиотелескоп—радиометр; Δf — полоса частот радиометра; τ — постоянная времени радиометра.

Для источников с $\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_{\text{а}}$ справедливо равенство

$$kT_{\text{А}} = PS_{\text{эф}}, \quad (6)$$

k — постоянная Больцмана; P — интегральная плотность потока радиоизлучения.

Подставляя (5) и (6) в (4) и полагая в первом приближении $T_{\text{ш}1} = T_{\text{ш}2}$, для источников со сплошным спектром имеем

$$(T_0/\Delta T_{\text{м}})_2 / (T_0/\Delta T_{\text{м}})_1 = (S_{\text{эф}2}/S_{\text{эф}1}) (\Delta f_2/\Delta f_1)^{1/2}. \quad (7)$$

Однако $S_{\text{эф}}$ определяется не только эффективным использованием геометрической площади главного зеркала, определенным его облучением, но и потерей мощности за счет переоблучения, т. е. коэффициентом рассеяния β . Если обозначить геометрическую эффективную площадь через $S_{\text{эф}1}$, то $S_{\text{эф}} = S_{\text{эф}1} (1 - \beta)$. Величина $1 - \beta$ есть отношение мощности, «перехватываемой» зеркалом (P_3), к мощности, излучаемой облучателем P_0 . Очевидно, что

$$P_3/P_0 = \Omega_3/\Omega_0 = N\Delta\psi/\Delta\psi_0 = \zeta, \quad (8)$$

где Ω_3 — угловая апертура зеркала; Ω_0 — угловая апертура облучателя; $\Delta\psi$ — угловой размер одного элемента из центра окружности; $N, N_{1,2}$ — количество выставленных элементов главного зеркала; $\Delta\psi_0 = \int_0^{2\pi} F(\psi) d\psi$ — эффективная ширина диаграммы направленности облучателя главного зеркала в горизонтальной плоскости [7].

Если угловая апертура главного зеркала АПЗ близка к эффективной ширине диаграммы направленности облучателя, т. е. $\Delta\psi_0 \approx N\Delta\psi$, то для источника, размеры которого меньше размеров диаграммы направленности в горизонтальном направлении ($\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_{\text{а}}$), справедливо соотношение

$$T_{\text{А}} \sim T_{\text{ш}} N \quad (9)$$

($T_{\text{я}}$ — яркостная температура источника; размеры отражающих элементов постоянны), а для источника с $\Omega_{\text{ист}} \gg \Omega_{\text{а}}$

$$T_{\text{А}} \approx T_{\text{я}}. \quad (10)$$

Если угловая апертура главного зеркала меньше эффективной ширины диаграммы направленности облучателя, т. е. $\Delta\phi_0 > N\Delta\phi$, то антенная температура наблюдаемого источника изменится пропорционально ζ и будет равна

$$T'_{\text{А}} = T_{\text{А}}\zeta. \quad (11)$$

Подставляя последовательно (9), (10) в (11), получим $T'_{\text{А}} \sim N^2$. Это соотношение справедливо для источников с $\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_{\text{а}}$. Если же $\Omega_{\text{ист}} \gg \Omega_{\text{а}}$, то $T'_{\text{А}} \sim N$. Тогда (7) примет вид

$$(T_{\text{с}}/\Delta T_{\text{м}})_2 / (T_{\text{с}}/\Delta T_{\text{м}})_1 = (N_2/N_1)^2 (\Delta f_2/\Delta f_1)^{1/2} \quad (12)$$

— для точечного источника. Для протяженного источника, согласно формуле (4),

$$(T_{\text{с}}/\Delta T_{\text{м}})_2 / (T_{\text{с}}/\Delta T_{\text{м}})_1 = (N_2/N_1) (\Delta f_2/\Delta f_1)^{1/2}, \quad (T_{\text{м}1} = T_{\text{м}2}). \quad (13)$$

Оценим допустимые полосы радиометров (Δf) при наблюдении методом «эстафеты с зонированием». Из-за смещения отражающих элементов антенны по радиусу электромагнитные волны с $\lambda + \Delta\lambda$, отраженные от поверхности главного зеркала, собираются в фокусе антенны с фазовыми искажениями $\Delta\lambda k$. При наблюдениях с зонированием на частоте f полоса частот радиометра, для которой сохраняется пространственно-временная когерентность при допустимых фазовых погрешностях $\delta = \pi/4$, определяется как

$$\Delta f = f / (8k_{\text{max}}). \quad (14)$$

Заметим, что Δf не зависит от λ , так как $f \sim 1/\lambda$, $k \sim 1/\lambda$ [4, 5]. Задаваясь допустимыми фазовыми искажениями $\delta = \pi/4$, k_{max} — целыми числами λ , полученными из приведенных расчетов, λ — длиной волны наблюдения, по формуле (14) находим допустимую полосу частот радиометра, при которой сохраняется пространственно-временная когерентность принимаемого сигнала.

Из таблиц 7—9, в которых представлены результаты таких расчетов, вытекает следующее.

1. Для высот наблюдений $H = 3.5 \div 83.8^\circ$ и любом положении вторичного отражателя относительно центра круга допустимая полоса частот радиометра, при которой сохраняется пространственно-временная когерентность, равна $\Delta f = 1$ МГц.

2. Для наблюдений источников (в частности, Солнца) с высотами $H = 3.5 \div 70^\circ$ допустимая полоса частот радиометра $\Delta f = 3$ МГц при положении вторичного отражателя в центре круга ($F = 0$) и $\Delta f = 7$ МГц при $F = 100$ м. Согласно данным работы [8], радиометр высокочувствительного комплекса с $\lambda = 3.9$ см, используемый на РАТАН-600, имеет следующие характеристики: $\lambda = 3.9$ см, $\Delta T_{\text{ш}1} = 0.015$ К ($\tau = 1$ с), $\Delta f_1 = 0.7$ ГГц. Учитывая, что для метода «эстафеты с зонированием» $\Delta f_2 = 1$ МГц, по формуле (12) определяем изменение чувствительности системы за счет сужения полосы и уменьшения эффективной площади поверхности рабочей части антенны (табл. 10).

При наблюдении Солнца методом «эстафеты с зонированием» отношение сигнал/шум уменьшается в 40—50 раз, а чувствительность радиометров падает

ТАБЛИЦА 9

H	N_2	k_{max}	Δf , МГц	ρ
3.5°	56	136	6	59''
35	66	155	5	50
58	94	202	4	36
70	154	285	3	22
83.8	450	775	1	12

ТАБЛИЦА 10

H	N_1	N_2	$(T_c/\Delta T_m)_2/(T_c/\Delta T_m)_1$ $\varrho_i < \varrho_a$
3.5°	56	144	6.6×26
35	66	154	5.4×26
58	94	188	4.0×26
70	154	222	2.1×26

до $\Delta T_m = 2$ К за счет сужения полосы частот радиометра по сравнению с $\Delta T_m = 0.1$ К для «штатного» режима наблюдений [6]. Чувствительность $\Delta T_m = 2$ К вполне достаточна для наблюдений тонкой структуры локальных источников на Солнце.

Выводы. 1. В 1981—1983 гг. разработан новый режим наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 — метод «эстафеты с зонированием», который позволяет увеличить апертуру рабочей части антенны по сравнению с апертурами, возможными в методе «эстафеты», и увеличить угловое разрешение антенны до секунд дуги в сантиметровом диапазоне длин волн ($\lambda = 4$ см, $\rho = 2'$ в методе «эстафеты» и $\rho = 60'' \div 10''$ в методе «эстафеты с зонированием»).

2. Зонируемые пути при неподвижном положении вторичного отражателя в центре круга равны $\Delta L = 3.5 \div 18.7$ м для высот наблюдений $H = 3 \div 82^\circ$. При вращении вторичного отражателя в соответствии с изменением азимута наблюдаемого источника достигается несколько большая апертура антенны, а $\Delta L = 5.5 \div 30$ м для $H = 3 \div 83.8^\circ$.

3. Оптимальное положение вторичного отражателя, при котором достигается апертура и угловое разрешение, близкие к максимальным для заданных высот наблюдений, соответствует $F = 40 \div 50$ м ($\rho = 14 \div 11''$) для $H > 72^\circ$ и $F \approx 100$ м ($\rho = 15 \div 17''$) для $H = 35 \div 70^\circ$. Наличие рельсовых путей, расположенных по окружности, радиус которой равен ~ 100 м, и использование перемещения вторичного отражателя вдоль них позволило бы наблюдать радиоизлучение Солнца в летнее время в течение ~ 10 ч с угловым разрешением $\rho = 15 \div 17''$.

4. При наблюдении методом «эстафеты с зонированием» для сохранения пространственно-временной когерентности принимаемого сигнала от космического источника радиоизлучения допустимая полоса частот радиометра $\Delta f = 10$ МГц ($H = 3 \div 35^\circ$), если используется весь диапазон радиальных перемещений, равный 1 м. При наблюдениях быстропеременных процессов необходимо сократить время между наблюдениями за счет сокращения времени установки антенны, что достигается путем уменьшения диапазона радиальных перемещений. Так, уменьшение диапазона радиальных перемещений до 30 см приводит к сильному зонированию поверхности антенны и сужению допустимой полосы частот радиометров до $\Delta f = 5 \div 6$ МГц ($H = 3.5 \div 35^\circ$) и $\Delta f = 1$ МГц ($H = 3.5 \div 83.8^\circ$).

5. Для наблюдений Солнца ($H = 3.5 \div 70^\circ$) допустимая полоса частот радиометра $\Delta f = 3$ МГц при положении вторичного отражателя в центре круга и $\Delta f = 7$ МГц при $F = 100$ м.

6. Уменьшение эффективной площади рабочей части антенны, а также сужение полосы частот радиометра приводят к падению чувствительности системы. Наиболее целесообразно использовать метод «эстафеты с зонированием» для спектральных наблюдений и наблюдений тонкой структуры локальных источников на Солнце. При положении вторичного отражателя в центре круга отношение сигнал/шум при прохождении Солнца через диаграмму направленности для B -компоненты уменьшается в ~ 50 раз.

В случае спектральных наблюдений источников малых угловых размеров изменение чувствительности (m) системы в основном обусловлено уменьшением $S_{эф}$ и в первом приближении равно квадрату отношения количества элементов, выставленных при наблюдении методом «эстафеты с зонированием» и наблюдении в «штатном» режиме соответственно: $m = 2 \div 7$ для высот наблюдений $H = 70 \div 3.5^\circ$ ($F = 0$).

Литература

1. Радиотелескоп РАТАН-600 / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 3—12.
2. Голубчина О. А., Голубчин Г. С. Метод «эстафеты». — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1981, 14, с. 125—131.
3. Большой пулковский радиотелескоп / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис. — Изв. ГАО, 1960, 164, с. 3—20.
4. Парийский Ю. Н., Шиврис О. Н. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. — Изв. ГАО, 1972, 188, с. 13—39.
5. Кайдановский Н. Л. Сопровождение источников радиоизлучения при наблюдениях с помощью антенны переменного профиля АПП. — *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО), 1975, 7, с. 214—221.
6. Голубчина О. А., Голубчин Г. С. Попытки построения двумерного изображения Солнца по наблюдениям, выполненным на РАТАН-600 методом «эстафеты». — *Радиофизика*, 1983, 26, № 11, с. 1472—1480.
7. Ходжамухаммедов Н., Стоцкий А., Боровик В. Н. Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля. — *Радиотехника и электроника*, 1970, 2, с. 257—261.
8. Мгновенный спектр ЗС-84 по наблюдениям на 16 частотах на РАТАН-600 / А. Б. Берлин и др. — *Письма в АЖ*, 1973, 6, № 10, с. 614—619.