

УДК 520.27+520.872+520.876

ПРОЕКТ “РАДИОАСТРОН”. ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА В ПОЛЕТЕ В 2011–2013 гг.

© 2014 г. Ю. А. Ковалев¹, В. И. Васильков¹, М. В. Попов¹, В. А. Согласнов¹, П. А. Войцки¹, М. М. Лисаков¹, А. М. Кутькин¹, Н. Я. Николаев¹, Н. А. Нижельский², Г. В. Жеканис², П. Г. Цыбулев²

¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз
ykovalev@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.12.2013 г.

Приведены результаты большого количества антенных радиометрических измерений в диапазонах 92, 18, 6.2, 1.35 и (1.7–1.2) см по данным штатной телеметрической системы космического аппарата *Спектр-Р*. Использовались как специальные сеансы наблюдений калибровочных объектов в режиме работы одиночного космического радиотелескопа (КРТ), так и многочисленные наблюдения исследуемых источников в режиме наземно-космического интерферометра. Полученные результаты согласуются с первыми результатами Кардашева и др. (2013): в пределах (10–15)% в диапазонах 92, 18 и 6.2 см и (20–25)% в диапазоне 1.35 см. Измерения в 8 поддиапазонах на длинах волн от 1.7 до 1.2 см показывают, в основном, монотонное возрастание эквивалентной спектральной плотности потока шумового излучения системы (SEFD) с частотой, согласующееся с расчетными оценками в обсуждаемой модели. Чувствительность наземно-космического интерферометра в 5 поддиапазонах на длинах волн от 1.35 до 1.7 см может быть до полутора раз выше, а в 3-х поддиапазонах от 1.35 до 1.2 см – до полутора раз ниже, чем в диапазоне 1.35 см. Вклад КРТ в чувствительность интерферометра, пропорциональный корню квадратному из SEFD, близок к проектному в диапазонах 92 и 18 см и уменьшает проектную чувствительность примерно в 1.5 и 2 раза в диапазонах 6.2 и 1.35 см, соответственно. Эти отличия реализованных значений от проектных не существенно повлияли на выполнение научной программы.

DOI: 10.7868/S0023420614050082

ВВЕДЕНИЕ

Описание КА *Спектр-Р*, космического радиотелескопа (КРТ), научной аппаратуры и наземных испытаний даны в [1–3]. Результаты летных испытаний, методика и первые результаты антенных измерений основных параметров телескопа радиоастрономическими методами в радиометрическом режиме для диапазонов 92, 18, 6.2 и 1.35 см приведены в [4–6] – для эффективной площади, шумовой температуры, диаграммы направленности, погрешности наведения на источник и др.

В данной статье сообщается о новых результатах периодического контроля основных параметров КРТ в полете, полученных в течение 2011–2013 гг. Антенные измерения выполнены как в специальных сеансах наблюдений калибровочных астрономических объектов, так и в процессе текущих сеансов научных наблюдений в режиме наземно-космического радиоинтерферометра.

Впервые представлены результаты антенных измерений в 8 поддиапазонах интервала частот 18–25 ГГц, предназначенных для использования в режиме многочастотного синтеза изображений

в дальнейших работах с радиоинтерферометром. Для калибровки этих измерений по потоку, кроме известных протяженных первичных калибровочных источников (Кассиопея А, Лебедь А, Краб, Дева А), использовались также несколько квазиточечных для КРТ сильных переменных внегалактических объектов (3С 84, 3С 273, 3С 279), спектральные плотности потока излучения которых в близкие даты измерялись по известным вторичным калибраторам на радиотелескопе РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории РАН (Нижний Архыз, Россия) и 100-м телескопе Института радиоастрономии общества Макса Планка (Эффельсберг, Германия).

1. ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения антенных параметров основаны на относительных измерениях эквивалентной спектральной плотности потока шумового излучения системы F_{sys} [Ян] (SEFD) – относительно астрономических калибраторов. Эквивалентная шумовая температура системы (радиотелескопа) T_{sys}

измерялась относительно считающейся известной антенной температуры бортовых генераторов шумового сигнала (в градусах К), входящих в состав каждого научного приемника.

Бортовой научный комплекс включает в себя 4 радиоастрономических супергетеродинных приемника – на диапазоны 92, 18, 6.2 и 1.35 см. Приемник диапазона 1.35 см обеспечивает также прием сигнала в 8 переключаемых поддиапазонах от 1.7 до 1.2 см с помощью выбора одного из поддиапазонов соответствующими командами. Блоки входных малощумящих усилителей (МШУ) приемников всех диапазонов, кроме 92 см, вынесены в открытый космос и размещены на “холодной плите”, охлаждаемой до температуры 130 К радиационным способом. Каждый приемник состоит из 2-х идентичных каналов, на входы которых от антенны через блок антенных облучателей (БАО) с разделителями поляризаций поступает излучение в левой и правой круговых поляризациях. Каждый канал имеет два параллельных выхода: 1) радиометрический выход – с протектированным сигналом, который поступает на телеметрическую систему космического аппарата и используется в антенных измерениях, 2) интерферометрический выход – с сигналом на промежуточной частоте, который после дальнейших преобразований используется в работе наземно-космического интерферометра.

Специальные сеансы наблюдений калибровочных объектов обычно проводились в режиме работы одиночного телескопа. Тогда телеметрическая информация после буферной записи и хранения в бортовом запоминающем устройстве передавалась на Землю в течение суток через малонаправленную антенну по служебному телеметрическому радиоканалу космического аппарата. При интерферометрических наблюдениях исследуемых источников данные телеметрической системы последовательно размещаются в заголовках каждого кадра потока данных для интерферометра и передаются на Землю в реальном времени через остронаправленную антенну диаметром 1.5 м по научному высокоинформативному радиоканалу. Это дает возможность выделять телеметрируемый радиометрический сигнал из интерферометрического потока данных с КРТ. Таким путем в данной работе получены результаты антенных измерений по источникам, исследуемым с интерферометром в научных программах.

2. ОБСУЖДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Диапазоны 92, 18, 6.2 и 1.35 см. Анализ измерений показывает, что практически все основные антенные параметры изменяются от измерения к измерению. Основную причину этих изменений мы связываем с изменениями температурных условий антенно-фидерного тракта и приемника. Фи-

зические температуры элементов антенно-фидерного тракта и МШУ на холодной плите могут меняться из-за изменений угла между направлениями на Солнце и объект измерения от сеанса к сеансу. Чем ближе этот угол к проектной границе ($\approx 110^\circ$) допустимой работы КРТ, тем больших отклонений физической и шумовой температуры от их средних значений можно ожидать. При этом должен меняться и вклад в эквивалентную шумовую температуру системы от потерь в антенных облучателях с разделителями поляризаций, поэтому можно ожидать также заметных вариаций эквивалентной шумовой температуры T_{NS} калибровочного сигнала. Этот сигнал от внутреннего шумового генератора поступает в тракт приемника на входе МШУ и приводится ко входу телескопа, “пересчитываясь” через все элементы антенно-фидерного тракта.

Поэтому ниже для упрощения анализа предполагалось выполненным условие постоянства средних значений T_{NS} и эффективной площади A_{eff} . Тогда все их реальные вариации автоматически относятся на счет изменений T_{sys} . Заметим, что такая процедура не влияет на корректность “астрономической калибровки” измерений с помощью параметра F_{sys} (SEFD), зависящего от отношения $T_{\text{sys}}/A_{\text{eff}}$. Обоснованием допустимости этого условия в данном случае могут служить приведенные ниже результаты для среднеквадратичных отклонений T_{sys} и F_{sys} по калибровочным и исследуемым источникам, которые не превышают примерно 13%.

В пределах погрешности измерений полученные результаты для средних значений системной температуры T_{sys} и плотности потока F_{sys} (SEFD) в диапазонах 92, 18, 6.2 и 1.35 см (см. рис. 1, 2 и табл. 1, 2), с учетом различного вклада фона неба, согласуются как для калибровочных и исследуемых источников, так и с первыми результатами, приведенными в работе [5]: в пределах (20–25)% для диапазона 1.35 см и (10–15)% для остальных диапазонов. Около половины от этих значений может быть связана с медленной систематической эволюцией параметров, включая их калибровку.

Заметный вклад в наблюдаемый разброс значений T_{sys} относительно среднего может давать изменение рассогласования МШУ с трактом “БАО-вход МШУ” и связанное с этим изменение коэффициента шума МШУ, которые зависят от физических температур БАО и МШУ (развязки на входе МШУ, как обычно, отсутствуют для понижения шумовой температуры приемника).

2.2. Диапазон (18–25) ГГц. Диапазон предназначен для использования в режиме многочастотного синтеза интерферометра и состоит из 8 следящих поддиапазонов (с указанными централь-

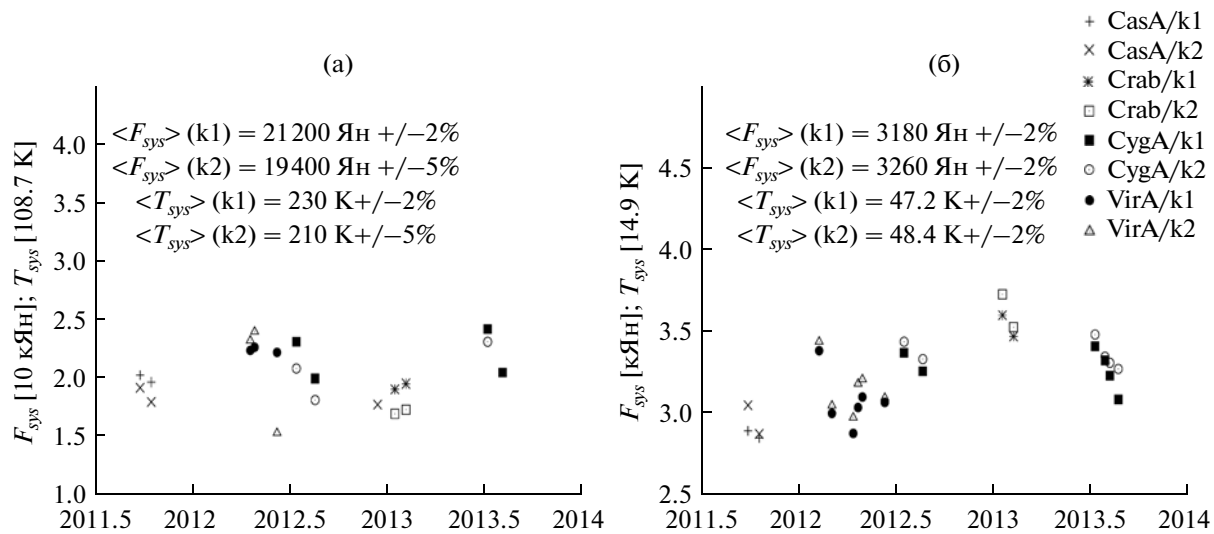


Рис. 1. Параметры КРТ, измеренные по калибраторам в диапазоне 92 см (а) и 18 см (б) в 2011–2013 гг. Канал 1 (к1) соответствует приему левой круговой поляризации, канал 2 (к2) – правой.

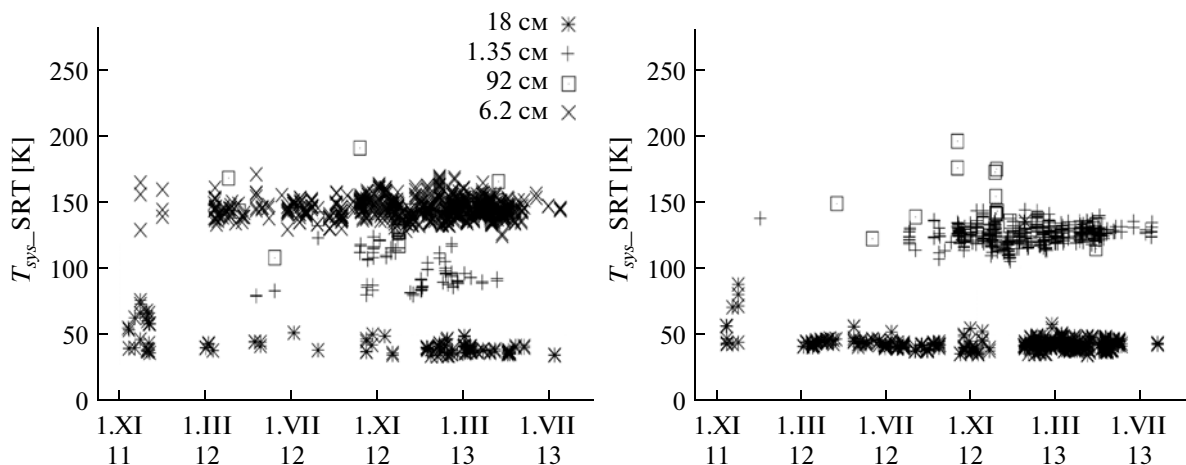


Рис. 2. Параметры КРТ, измеренные по исследуемым источникам в 2011–2013 гг.: а – канал 1 – правая круговая поляризация для диапазона 1.35 см, левая – для остальных диапазонов; б – канал 2 – левая круговая поляризация для диапазона 1.35 см, правая – для остальных диапазонов.

ными частотами), отстоящих друг от друга на 960 МГц [5]: $F-4$ (18392 МГц), $F-3$ (19352 МГц), $F-2$ (20312 МГц), $F-1$ (21272 МГц), $F0$ (22232 МГц), $F1$ (23192 МГц), $F2$ (24152 МГц), $F3$ (25112 МГц) – см. рис. 3. Значения центральных частот могут быть на 4 МГц больше или меньше указанных, в зависимости от заданного режима работы научной аппаратуры. Результаты измерений F_{sys} ($SEFD_{SRT}$) в этих поддиапазонах, приведенные на рис. 3, и оценка чувствительности интерферометра в табл. 3 подтверждают теоретически ожидаемый монотонный “ход” $SEFD_{SRT}$ и чувствительности интерферометра с ростом частоты, за исключением, быть может, их поведения на крайних частотах – около 18 и 25 ГГц. Приведен-

ные в табл. 3 чувствительности рассчитаны по известной формуле [5]

$$\sigma_{GBT-SRT} = b \sqrt{\frac{SEFD_{GBT} SEFD_{SRT}}{2\Delta\nu_{IF}\Delta t}}, \quad (1)$$

где $b = 1/0.637$, $SEFD_{GBT} = 23$ Ян (для радиотелескопа НРАО в Green Bank), $\Delta\nu_{IF} = 16$ МГц – полоса регистрируемых частот, $\Delta t = 5$ мин – время интегрирования сигнала. В зависимости от режима работы интерферометра возможна также регистрация сигнала в полосе $\Delta\nu_{IF} = 32$ МГц [5]. Значение $\Delta\nu_{IF} = 16$ МГц использовано для единообразия с [6].

Таблица 1. Результаты массовых измерений и расчетных оценок при наблюдениях калибровочных и исследуемых источников в левой (LCP) и правой (RCP) круговых поляризациях в 2011–2013 гг.

Параметр	1.35 см	6.2 см	18 см	92 см
	LCP; RCP	LCP; RCP	LCP; RCP	LCP; RCP
1 КАЛИБРАТОРЫ				
1.1 T_{sys} , К	98 ± 13; 82 ± 11	133 ± 17; –	47.2 ± 1.0; 48.4 ± 1.0	230 ± 5; 210 ± 11
1.2 F_{sys} , кЯн	36.0 ± 3.6; 30 ± 3.0	10.5 ± 1.1; –	3.18 ± 0.06; 3.26 ± 0.07	21.2 ± 0.42; 19.4 ± 1.0
2 ДРУГИЕ ОБЪЕКТЫ				
2.1 T_{sys} , К	127 ± 8; 100 ± 10	147 ± 8; –	41.0 ± 1.0; 43.5 ± 4.0	145 ± 15; 147 ± 15
2.2 F_{sys} , кЯн	46.7 ± 3.0; 36.8 ± 3.7	11.6 ± 0.6; –	2.76 ± 0.27; 2.93 ± 0.27	13.3 ± 1.4; 13.5 ± 1.4
3 РАСЧЕТ T_{sys} и F_{sys}				
3.1 Коэфф. передачи:				
– Кабеля K_3/t_3	0.99/157	0.94/157	0.95/157	0.98/233
– БАО K_2/t_2	0.76; 0.84/175	0.68/175	0.95/175	0.83/175
– Антенны K_1/t_1	0.98/200	0.98/200	0.98/200	0.98/200
3.2 T_{rec}/t_4 , К	45 /140	26/140	15/140	39/290
3.3 ΔT_{rec} , К	61; 55	42	17	49
3.4 ΔT_{Cable} , К	2	15	8.9	6
3.5 ΔT_{BAO} , К	56; 34	84	9.4	36
3.6 ΔT_A , К	4	4	4	4
3.7 T_{sky} , К	3	3	3	3 + 50
3.8 T_{sys} , К	126; 98	148	42.3	98 + 50
3.9 F_{sys} , кЯн	46.4; 36.1	11.7	2.85	13.6
Калибраторы:				
3.10 T_{sky} , К	–	–	3 + 5	3 + 120
3.11 T_{sys} , К	–	–	42.3 + 5	98 + 120
3.12 F_{sys} , кЯн	–	–	3.18	19.5

Примечание. Измерения калибраторов в диапазонах 1.35 и 6.2 см даны за 2011–2012 гг. Ошибки шкалы спектральной плотности потока не включены. В строках 3.3–3.6 и 3.7 (3.10) даны оценки вкладов в T_{sys} от шумовых температур приемника T_{rec} , кабеля (волновода – в диапазоне 1.35 см) T_{Cable} , блока антенных облучателей T_{BAO} , антенны T_a и фона неба T_{sky} , соответственно.

Из данных на рис. 3 и в табл. 3 следует возможность проведения интерферометрических измерений в этом режиме в пяти длинноволновых поддиапазонах с $F-4$ по $F0$ с чувствительностью не ниже, чем в $F0$ на частоте 22 ГГц (длина волны 1.35 см). В трех коротковолновых поддиапазонах $F1$, $F2$ и $F3$ чувствительность может быть до полутора раз меньше, чем в $F0$, из-за более сильного вклада фазовых погрешностей на длинах волн меньше 1.35 см. Эта длина волны близка к так называемой “проектной минимальной длине волны использования телескопа” $\lambda_{min} \equiv (16-20) \sigma \approx 18\sigma = 1.39$ см при проектном значении $\sigma = 0.77$ мм (подробнее см. [8–10, 5] и разделы 3.2 и 3.3 ниже).

3. ЧИСЛЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Эквивалентная шумовая температура системы T_{sys} КРТ. Для объяснения измеренных значений T_{sys} оценим численно параметры антенны, антенно-фидерной системы и приемников, влияющие на T_{sys} . Как обычно, систему КРТ в каждом из поляризационных каналов представим в виде блок-схемы из 4-х последовательных блоков [5]: антенна – 1; блок антенных облучателей (БАО, с разделителями входной поляризации на левую и правую круговые) – 2; СВЧ-кабель/волновод, соединяющий блоки 2 и 4, – 3; приемник с входным малошумящим усилителем МШУ – 4. Тогда эквивалентная шумовая температура T_{sys} , приведенная

Таблица 2. Основные параметры КРТ по [5] и новым измерениям

Параметр	1.35 см	6.2 см	18 см	92 см
	LCP; RCP	LCP; RCP	LCP; RCP	LCP; RCP
КРТ в полете, 2011–2013:				
1. $(\vartheta_{0.5} \pm 5\%) \cdot (\varphi_{0.5} \pm 5\%)$,	6.0' × 13'	25'	72'	6°.1
2. $A_{\text{eff}} \pm 10\%$, м ² ;	7.5	35	41	30
3. КИП = $A_{\text{eff}}/A_{\text{geom}} \pm 10\%$	0.1	0.45	0.52	0.38
4. $T_{\text{sys}} \pm 13\%$	127; 100	147; –	41.0; 43.5	145; 147
5. $F_{\text{sys}} \pm 10\%$ (SEFD), кЯн	46.7; 36.8	11.6; –	2.76; 2.93	13.3; 13.5
6. Усиление, Ян/К	368	78.9	67.3	92.0
7. $\Delta\vartheta_S$	–1.2' ± 0.2'			
8. $\Delta\varphi_S$	<1.5'			
9. $\Delta\varphi_P$	2.5'			
10. σ_{SVLBI} , мЯн (при $\Delta t = 5$ мин; $\Delta\nu = 16$ МГц)	17; 15	5; –	3; 3	14; 14
11. $\alpha_D = (\vartheta_{0.5} \cdot \varphi_{0.5}) D/\lambda$	1.29 × 2.80	1.17	1.16	1.16

Примечание. В строках 1–11 даны: ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности – 1, эффективная площадь – 2, коэффициент использования площади – 3, эквивалентная температура шума и плотность потока шумового излучения системы – 4 и 5, усиление телескопа – 6, систематическая погрешность при сканировании площадки неба по двум координатам (строки 7 и 8) после ввода постоянной поправки (строка 9) в наведение телескопа, чувствительность интерферометра КРТ – Green Bank Telescope по (1) и [6] – 10, отношение измеренной ширины к идеальной ширине λ/D главного лепестка диаграммы направленности – 11.

ко входу такой системы, может быть записана как:

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{sky}} + T_1 + T_2 L_1 + T_3 L_1 L_2 + T_4 L_1 L_2 L_3, \quad (2)$$

$$T_i = t_i (L_i - 1), \quad L_i \equiv 1/K_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Здесь: T_{sky} – антенная температура неба на входе антенны; T_i – эквивалентные шумовые температуры 4-х блоков, приведенные ко входу своего блока: антенны ($i = 1$), БАО ($i = 2$), кабеля ($i = 3$) и приемника ($i = 4$); t_i , L_i и K_i – физическая температура, коэффициенты потерь и передачи по мощности i -того блока, соответственно. Каждое слагаемое в (2) приводит (“пересчитывает”) шумовую температуру блока ко входу антенны, т.е. ко входу всей системы КРТ, и, таким образом, позволяет оценить вклад соответствующего блока в полную шумовую температуру системы радиотелескопа. При этом для упрощения предполагается, что потери L_i имеют только активную составляющую, а все блоки идеально согласованы друг с другом.

Заметим, что БАО дает вклад в 3 из 5 слагаемых в (2) (из-за отличия $L_2 = 1/K_2$ от идеального случая отсутствия потерь, когда L_2 равен единице). Поэтому потери в БАО являются наиболее весомыми потерями при формировании общей шумовой температуры телескопа. Значения L_2 , получающиеся ниже при согласовании расчетных и из-

меренных шумовых температур телескопа, в пределах примерно 10% близки к типичным значениям в наземных облучателях такого типа и обусловлены компактностью и соосностью облучателей, а также объединением их с разделителями поляризаций в единый 4-х частотный блок. Дополнительные потери в БАО в диапазоне 1.35 см могут возникать при образовании и распространении в нем высших типов волноводных мод из-за увеличенного диаметра круглого входного волновода (для обеспечения требования по работе облучателя в расширенном диапазоне частот от 18 до 25 ГГц, необходимого для интерферометрического режима синтеза частот).

Обычно физическая температура в реальных сеансах радиоастрономических наблюдений с КРТ поддерживалась системой терморегулирования в пределах $t_4 = (130–150)$ К для МШУ на холодной плите и $t_2 = (150–200)$ К для БАО с использованием радиационного охлаждения холодной плиты. Для численных оценок значений в (2) и (3) для всех диапазонов примем: $t_4 = 140$ К ($t_4 = 290$ К для диапазона 92 см), $t_2 = 175$ К, $t_3 = (t_2 + t_4)/2$, $t_1 = 200$ К, $T_{\text{sky}} = 3$ К и $K_1 = 0.98$ (проектное значение). Тогда для этих и значений других параметров, зависящих от диапазона и обсуждаемых ниже, получим расчетные оценки T_{sys} и соответствующие вклады от приемника, элемен-

тов антенно-фидерного тракта и фона неба, которые суммированы в табл. 1.

3.1.1. Диапазон 92 см. T_{sys} ($K_2 = 0.83$; $K_3 = 0.98$; $T_4 = 39$ К) = 3 + 4 + 36 + 6 + 49 = 98 К. Здесь и далее пять числовых слагаемых соответствуют вкладам от пяти слагаемых в (2). Отсюда видно, что основной вклад в температуру системы без фона Галактики дают вклады от БАО (третье слагаемое, 36 К) и МШУ (пятое слагаемое, 49 К). Предполагая, что разность измеренной температуры системы (см. табл. 1) с этой определяется, в основном, анизотропным излучением фона Галактики, получим $T_{sky} \approx 50$ К, $T_{sys} \approx 150$ К по исследуемым источникам в интерферометрических сеансах и $T_{sky} \approx 120$ К, $T_{sys} \approx 220$ К по калибраторам. Для проверки этого предположения требуется детальный анализ, учитывающий индивидуальные условия наблюдений.

3.1.2. Диапазон 18 см. T_{sys} ($K_2 = 0.95$; $K_3 = 0.95$; $T_4 = 15$ К) = 3 + 4 + 9.4 + 8.9 + 17 = 42.3 К. Вследствие сравнительно невысоких потерь, основной вклад вносят шумы МШУ, кабеля и БАО (слагаемые с пятого по третий). Небольшую разницу измеренных T_{sys} при наблюдениях калибраторов и наблюдениях других объектов можно отнести к соответствующему превышению фона вблизи плоскости Галактики, так как большинство исследуемых источников – внегалактические.

3.1.3. Диапазон 6.2 см. T_{sys} ($K_2 = 0.68$; $K_3 = 0.94$; $T_4 = 26$ К) = 3 + 4 + 84 + 15 + 42 = 148 К. В этом диапазоне уже отмечалось в [5] примерно двукратное превышение измеренной шумовой температуры над ожидаемой. Видно, что измеренное значение формально можно объяснить превышением активных потерь в БАО над проектными. Измерения по калибраторам и другим объектам в пределах погрешности совпадают. Вместе с тем, учитывая, что устойчивая работа в полете оказалась возможной только при раздельной работе с каналами левой и правой поляризаций (иначе оба канала находились в зашкале из-за самовозбуждения одного или обоих каналов [5]), возможен также механизм, при котором в полете, из-за температурной чувствительности характеристик МШУ и БАО (с разделителем поляризаций) при охлаждении от 300 до 130–150 К, ухудшилось согласование МШУ и БАО с трактом, возросли реактивные потери и коэффициент шума МШУ – так, что условия работы одного или обоих каналов оказались близкими к условиям самовозбуждения. Тем не менее, работа с каналами по отдельности по-прежнему была устойчивой.

3.1.4. Диапазон 1.35 см. T_{sys} ($K_2 = 0.84$; $K_3 = 0.99$; $T_4 = 45$ К) = 3 + 4 + 34 + 2 + 55 = 98 К – канал 1.

T_{sys} ($K_2 = 0.76$; $K_3 = 0.99$; $T_4 = 45$ К) = 3 + 4 + 56 + 2 + 61 = 126 К – канал 2. Как и выше, для объяснения средних измеренных значений T_{sys} доста-

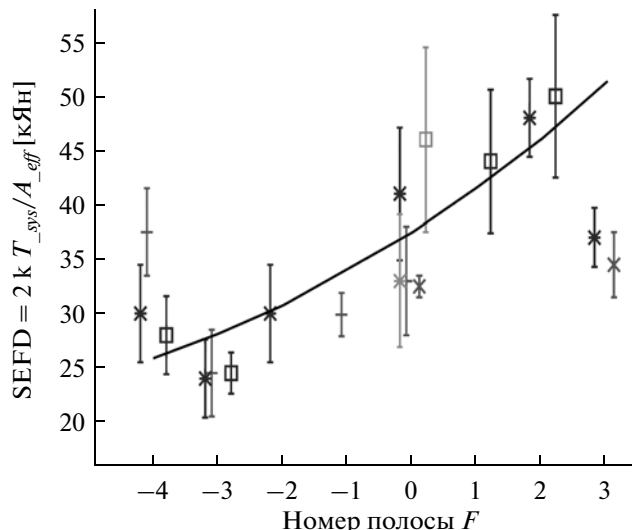


Рис. 3. Результаты измерений эквивалентной плотности потока излучения системы (SEFD) КРТ в 8-ми поддиапазонах (полосах) от F-4 до F3 на частотах от 18.4 до 25.1 ГГц по галактике 3С 84 в 2011–2012 гг. Значками с ошибками измерений представлены данные для канала 1 (правая круговая поляризация) – слева от вертикальной прямой с номером полосы F – и для канала 2 (левая круговая поляризация) – справа. Сплошная кривая – расчетная оценка в модели фазовых искажений.

точно допустить наличие активных потерь в БАО с указанными здесь и в табл. 1 средними значениями коэффициента передачи БАО при фиксированных остальных переменных, влияющих на T_{sys} . В общем случае следует учитывать также реактивные потери, вариации коэффициента шума МШУ и увеличение активных потерь $L_3 = 1/K_3$ из-за уменьшения проводимости покрытия стенок волновода со временем. Разброс индивидуальных измерений относительно среднего естественно получается варьированием физических и шумовых температур, а также других параметров, вхо-

Таблица 3. Оценка чувствительности $\sigma_{GBT-SRT}$ интерферометра КРТ–Green Bank Telescope

Полоса	Частота ГГц	SEFD _{SRT} , кЯн	$1\sigma_{GBT-SRT}$, мЯн
1. F-4	18.392	26	12
2. F-3	19.352	28	13
3. F-2	20.312	31	14
4. F-1	21.272	34	14
5. F0	22.232	37	15
6. F1	23.192	41	16
7. F2	24.152	46	16
8. F3	25.112	51	17

Таблица 4. Типовые значения потерь, КИП и A_{eff} , оцененные по методике для рефлекторных антенн [8]

Параметр	1.35 см	6.2 см	18 см
1. $A_{\text{eff}} = \text{КИП} A_{\text{geom}}$, м ²	21	36	39
2. КИП = $\eta_1 \eta_2 \eta_4 \eta_7 \eta_9 \eta_{10} \eta_{12}$	0.28	0.46	0.50
2.1. η_1 (потери на отражение)	0.96	0.96	0.96
2.2. η_2 (на поглощение)	0.85	0.85	0.90
2.3. η_4 (на переоблучение)	0.834	0.834	0.834
2.4. η_7 (на ср. кв. погрешность зеркала)	0.598	0.976	0.997
2.5. η_9 (на затенение от БАО)	0.96	0.96	0.96
2.6. η_{10} (на рассеяние на 4 тягах)	0.935	0.935	0.935
2.7. η_{12} (на неравномерность облучения)	0.773	0.773	0.773

дящих в соотношения (2)–(3). Индивидуальные вариации этих параметров зависят от физической температуры элементов антенно-фидерного тракта (т.е. от условий терморегулирования) и поэтому, в первую очередь, определяются изменениями ориентации космического радиотелескопа относительно Солнца в индивидуальных сеансах наблюдений. Разница измеренных средних значений F_{sys} и T_{sys} по калибраторам и другим объектам (около (20–25)% – см. табл. 1), кроме ошибок измерений, может включать в себя влияние различных температурных условий наблюдений этих объектов, в среднем.

3.2. Эффективная площадь и диаграмма направленности. Эффективная площадь A_{eff} на длине волны λ связана известными соотношениями с так называемыми “эффективными телесными углами” Ω_A диаграммы направленности антенны, Ω_{beam} главного лепестка диаграммы направленности и Ω_{lobe} вне главного лепестка:

$$\Omega_A = \int_{4\pi} D(\theta, \varphi) d\omega = \Omega_{\text{beam}} + \Omega_{\text{lobe}} = \lambda^2 / A_{\text{eff}}, \quad (4)$$

$$\Omega_{\text{beam}} = \int_{\omega_{\text{beam}}} D(\theta, \varphi) d\omega \approx k_0 \vartheta_{0.5} \varphi_{0.5}, \quad (5)$$

$$\Omega_{\text{lobe}} = \int_{\omega_{\text{lobe}}} D(\theta, \varphi) d\omega, \quad (6)$$

$$\frac{\Omega_{\text{beam}}}{\Omega_A} + \frac{\Omega_{\text{lobe}}}{\Omega_A} = 1. \quad (7)$$

В (4), (5) и (6) диаграмма направленности $D(\vartheta, \varphi)$ интегрируется по телесным углам в пределах 4π , главного лепестка и вне ее главного лепестка, соответственно, $\omega_{\text{lobe}} = 4\pi - \omega_{\text{beam}}$; $\vartheta_{0.5}$ и $\varphi_{0.5}$ – ширина главного лепестка по уровню половинной мощности во взаимно-перпендикулярных направлениях ϑ и φ , а коэффициент $k_0 = 1-1.15$ зависит от формы облучения зеркала ($k_0 = 1$ при од-

нородном распределении электрического поля по раскрытию, $k_0 = 1.13$ при гауссовом [7]). Первое слагаемое в (7) обычно называют коэффициентом использования диаграммы направленности, а второе – коэффициентом рассеяния излучения вне главного лепестка.

Следует обратить внимание на довольно распространенное заблуждение даже среди специалистов, согласно которому из измерений главного лепестка, якобы, можно получить значение эффективной площади. В действительности из (4)–(7) следует единственно правильное заключение: не имея информации о доле излучения, рассеиваемой антенной в эффективный телесный угол Ω_{lobe} (как в данном случае), корректно сделать это не представляется возможным.

Оценим значения эффективной площади КРТ, которые можно ожидать при типовых допустимых фазовых погрешностях в антенно-фидерной системе. Для этого рассмотрим коэффициент использования площади КИП = $A_{\text{eff}} / A_{\text{geom}}$, где A_{eff} и $A_{\text{geom}} = 78.5 \text{ м}^2$ – эффективная и геометрическая площади раскрытия зеркала КРТ, соответственно, и используем представление КИП через 7 основных из 12 обычно применяемых коэффициентов [8, 7], каждый из которых описывает одну из типовых причин потерь площади для рефлекторных антенн (см. строки 2.1–2.7 в табл. 4; остальные 5 коэффициентов полагаем равными 1).

Из сравнения полученных типовых оценок эффективной площади и КИП, приведенных в табл. 4, с результатами измерений (см. табл. 2) видно их хорошее согласие для диапазонов 6.2 и 18 см. Отличие типового проектного значения 21 м^2 от измеренного в диапазоне 1.35 см связано с дополнительными фазовыми погрешностями в раскрытии зеркала, анализ возможных причин возникновения которых представлен в нашей работе [5] и будет продолжен ниже. Типовая оценка КИП для диапазона 92 см не проводилась, так как

отношение длины волны к диаметру зеркала недостаточно мало для корректности использования значений типовых коэффициентов, и надежность такого оценивания представляется не высокой.

Летные испытания телескопа “РадиоАстрон” [4–5] показали согласие основных измеренных характеристик с проектными в диапазонах 92 и 18 см и отличие их от проектных для эквивалентной шумовой температуры системы в диапазоне 6.2 см и для ширины главного лепестка и эффективной площади в диапазоне 1.35 см. На минимальной длине волны 1.35 см проектного использования космического радиотелескопа главный лепесток диаграммы направленности оказался заметно асимметричным (в 2 раза шире проектного значения в одном из взаимно-ортогональных сечений), что указывало на соответствующие погрешности фазового распределения поля в раскрыве антенны. Как следствие, эти фазовые погрешности привели к уменьшению эффективной площади, а через нее – к увеличению SEFD и уменьшению чувствительности КРТ и интерферометра [5]. Дальнейшие измерения и анализ, о которых сообщается в настоящей работе, подтверждают эти результаты.

3.3. Модель фазовых искажений. Одна из возможных причин таких фазовых искажений рассмотрена в работе [5]: астигматизм системы из-за особенностей фазовой диаграммы направленности облучателя. Другая оценивается здесь: астигматизм, вызванный небольшим изменением формы зеркала КРТ, которое в первом приближении переводит параболическое зеркало с круговым раскрывом диаметром D и фокальным расстоянием F в слабо эллиптический раскрыв с главными осями эллипса D_1 и D_2 , близкими к D , и соответствующими центрами фокусировки F_1 и F_2 во взаимно-ортогональных сечениях. Такая деформация формы зеркала представляется возможной, если остаточные усилия натяжений в тягах к 27 жестким лепесткам зеркала – различные и превышают проектные. Можно ожидать, что более сильные натяжения приводят к более “мелким профилям” квазипараболической поверхности в соответствующих сечениях зеркала, со смещением центров фокусировки в направлениях “от зеркала”.

Для упрощения численных оценок, в любых сечениях, содержащих ось зеркала, предполагаем сохранение положения оси и параболического профиля сечения с проектным отношением $a = F/D$. Тогда изменение размера раскрыва в данном сечении с D на $D_1(D_2)$ приведет к несовпадению фокуса F с $F_1(F_2)$ в этом сечении, т.е. к астигматизму зеркала, а облучатель, жестко установленный на Земле в расчетный фокус F , окажется сдвинутым в полете относительно F_1 или/и F_2 , что для системы из 27 лепестков даст суммарные фа-

зовые погрешности в раскрыве и уширение диаграммы направленности телескопа. Рассмотрим количественно этот эффект, воспользовавшись результатами монографии Кюна [9] для связи максимальной квадратичной фазовой ошибки Φ у края параболического зеркала со сдвигом δ облучателя из фокуса вдоль фокальной оси на длине волны λ :

$$\Phi = 4\pi \frac{\delta}{\lambda} \frac{1}{1 + (4a)^2}. \quad (8)$$

Полагая в (8) согласно [5] $\Phi \approx 1.5\pi$, $\lambda = 1.35$ см, $a = 0.43$ (проектное значение для КРТ), а также учитывая для данного случая $\delta = \Delta F = a\Delta D$, $\Delta F \equiv F_1 - F_2$, $\Delta D \equiv D_1 - D_2$, $D_2 = 10$ м, получим $\delta \approx 2.0$ см, $\Delta D = \delta/a \approx 2.0/0.43 \approx 4.7$ см и эксцентриситет E эллипса $E = D_1/D_2 \approx 10.047/10 \approx 1.0047$. Таким образом, при сделанных предположениях небольшая деформация формы зеркала КРТ, переводящая круглый раскрыв диаметром 10 м в эллиптический с эксцентриситетом $E \approx 1.0047$ (главные оси эллипса равны примерно 10 м и 10.047 м), может стать причиной астигматизма зеркала, приводящего к наблюдаемым особенностям результатов измерений характеристик КРТ в диапазоне 1.35 см.

В 8 поддиапазонах для режима синтеза частот можно ожидать плавных изменений формы главного лепестка диаграммы направленности и эффективной площади телескопа, соответствующих изменениям фазовой погрешности (8) от $\Phi \approx 1.1\pi$ до $\Phi \approx 1.6\pi$ на частотах от 18 до 25 ГГц. Для остальных штатных диапазонов КРТ ($\lambda \geq 6.2$ см) фазовая погрешность (8) составит величину $\Phi \leq \pi/3.3$, близкую к $\Phi \leq \pi/4$, которую обычно считают допустимой фазовой погрешностью.

Оценим численно влияние фазовых погрешностей в антенно-фидерной системе на изменение эффективной площади $A_{\text{эф}}$ на частотах от 18 до 25 ГГц. В данном случае сделаем это с помощью типового значения площади, равного 21 м² согласно табл. 4, и произведения 3-х коэффициентов $k_1(\lambda)$, $k_2(\lambda)$, и k_3 : $A_{\text{эф}}/A_0 = k_1(\lambda)k_2(\lambda)k_3$. Здесь: $A_0 = 21/\eta_7 = 35$ м² соответствует типовой эффективной площади при полном отсутствии фазовых искажений ($\eta_7 = 0.598$ из табл. 4); $k_1(\lambda) = \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2]$ [8] учитывает известный вклад от случайных погрешностей фазы при среднеквадратичном отклонении σ профиля поверхности зеркала от идеального параболического ($k_1(\lambda) = \eta_7 = 0.598$ при $\lambda = 1.35$ см, $\sigma = 0.77$ мм); $k_2 = [\eta(\varphi = 0)\eta(\varphi = \Phi)]^{1/2}$ при $\eta(\varphi) = 6.55(1.01 - 0.2\cos\varphi)/(5.3 + \varphi^2)$ [10] дает оценку вклада от рассмотренного выше эффекта с квадратичной фазовой погрешностью (8) зеркала; $k_3 \approx 0.73$ – принятое здесь значение вклада от фазовой погрешности облучения зеркала, вклю-

чающей отличие фазовой диаграммы направленности БАО от идеальной (см. подробнее [5, 8, 10]).

Тогда при $\lambda = 1.35$ см, $T_{\text{sys}} = \text{const} = 100$ К, проектном значении $\sigma = 0.77$ мм, $\Phi \approx 1.5\pi$, получим $k_2(\lambda) = 0.49$, $A_{\text{eff}} = 21 k_2(\lambda) k_3 \text{ м}^2 = 7.5 \text{ м}^2$, $\text{SEFD}_{\text{SRT}} = 37$ кЯн и численную зависимость SEFD_{SRT} от частоты, которая показана на рис. 3 сплошной линией. Видно, что расчетная оценка в пределах точности согласуется с измерениями для всех поддиапазонов, кроме крайних. Отклонения расчетных значений относительно измеренных на крайних частотах около 18 и 25 ГГц могут объясняться нарушением предположения $T_{\text{sys}} = \text{const}$ в этих поддиапазонах. Соответствующие оценки ожидаемой чувствительности интерферометра для 8 поддиапазонов приведены в табл. 3.

Таким образом, результаты антенных измерений в 8-ми поддиапазонах на частотах от 18 до 25 ГГц (температура шумов системы, эффективная площадь, эквивалентная плотность потока излучения системы (SEFD), зависимость их от частоты) могут быть согласованно объяснены в модели фазовых искажений, развивающей модель, рассмотренную в [5].

Согласно нашим оценкам коэффициентов потерь (см. табл. 4) по известной методике [8], типовая эффективная площадь в диапазоне 1.35 см должна быть близка к 35 м^2 при отсутствии любых фазовых искажений и к 21 м^2 при наличии только проектных фазовых потерь k_1 площади из-за случайных ошибок поверхности зеркала; при этом коэффициент использования площади — около 0.45 и 0.27, соответственно.

Коэффициент $k_2 \approx 0.49$ в модели уменьшает типовую проектную площадь 21 м^2 в два раза из-за астигматизма и квадратичной фазовой погрешности поверхности зеркала, если предположить, что круглый раскрыв зеркала диаметром 10 м стал квазиэллиптическим с главными осями 10 м и 10.047 м, а коэффициент $k_3 \approx 0.73$ — еще примерно в полтора раза из-за фазовых искажений облучения зеркала, аналогичных [5]. В результате эффективная площадь с 35 м^2 (при $\eta_7 = k_1 = k_2 = k_3 = 1$) или с 21 м^2 (при $\eta_7 = k_1 = 0.598$) уменьшается до измеренного значения $A_{\text{eff}} \approx 7.5 \text{ м}^2$, и возникает асимметрия главного лепестка диаграммы направленности из-за астигматизма системы и суммарных фазовых погрешностей в раскрыве антенны.

Аналогичные фазовые погрешности и потери в антенно-фидерной системе, искажающие диаграмму направленности и уменьшающие эффективную площадь, случаи самовозбуждения приемника — типичная, хорошо известная ситуация для наземных радиотелескопов. Особенно — в начале эксплуатации на коротких длинах волн, близких к минимальной длине волны использования телескопа. Причины таких эффектов обыч-

но частично устраняются дополнительными юстировками поверхности и коррекцией облучения зеркала, поправками фокусировки, отладкой или заменой элементов антенно-фидерной системы и приемника, улучшением их согласования друг с другом.

Формально, в рамках обсуждаемой модели, можно уменьшить астигматизм, вызванный отклонением формы зеркала от проектной параболической, путем уменьшения остаточных сил натяжения лепестков через трос и тяги механизма раскрытия зеркала, — командами с Земли. Тем не менее, целесообразность такой работы представляется сомнительной до завершения наблюдений по основным приоритетным научным задачам.

Основные причины сомнений: 1) при неудаче нет гарантии возвращения формы антенны в прежнее положение, 2) придется проводить новые трудоемкие антенные измерения, 3) выигрыш в эффективной площади может сопровождаться проигрышем, — например, в наведении антенны, — который сегодня практически отсутствует, в т.ч. благодаря уширению главного лепестка диаграммы направленности. Новые неизбежные погрешности могут частично или полностью скомпенсировать ожидаемые в диапазоне 1.35 см улучшения: увеличение эффективной площади КРТ до 2 раз (из-за изменения k_2 от 0.5 до 1) и чувствительности интерферометра до полтора раз согласно (1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые результаты радиометрических измерений параметров космического радиотелескопа в 2011–2013 годах по калибровочным объектам с помощью одиночного КРТ и по большому количеству исследуемых источников в режиме интерферометра согласуются с первыми результатами, полученными Кардашевым и др. [5], — в пределах (10–15)% в диапазонах 92, 18 и 6.2 см и (20–25)% в диапазоне 1.35 см.

Основной вклад в SEFD и чувствительность КРТ в диапазонах 92, 18 и 6.2 см вносят шумы приемника и блока антенных облучателей, а в диапазоне 1.35 см — потери эффективной площади из-за фазовых погрешностей в антенно-фидерной системе. Вклад КРТ в чувствительность наземно-космического интерферометра, пропорциональный корню квадратному из измеренных значений SEFD, близок к проектному в диапазонах 92 и 18 см и уменьшает проектную чувствительность примерно в 1.5 и 2 раза в диапазонах 6.2 и 1.35 см, соответственно. Измеренный вклад КРТ увеличивает чувствительность интерферометра до 1.5 раз в 5-ти поддиапазонах на частотах от 22 до 18 ГГц и уменьшает ее до 1.5 раз в 3-х под-

диапазонах на частотах от 22 до 25 ГГц относительно чувствительности на 22 ГГц.

Основной вклад в эквивалентную шумовую температуру КРТ вносят приемник и блок антенных облучателей (БАО) с разделителями поляризации. Разброс значений этой шумовой температуры, через зависимость от физических температур МШУ и БАО, может быть связан с изменениями ориентации КРТ относительно Солнца в индивидуальных сеансах наблюдений.

Полученные результаты и опыт эксплуатации КРТ могут быть полезны при разработке будущих космических проектов (“Миллиметр” и др.; особенно учитывая, что антенна КРТ, вероятно, самая большая на сегодня конструкция, раскрытая в космосе). Они указывают на необходимость проектной оптимизации фазовых погрешностей поверхности и облучения зеркала и минимизации потерь как в отдельных элементах, так и в антенно-фидерной системе с приемниками в целом. Для уменьшения фазовых искажений вблизи минимальной длины волны использования телескопа может оказаться целесообразным дополнительное проектное недооблучение края зеркала, уменьшающее известный оптимальный уровень в несколько раз.

Проект “РадиоАстрон” осуществляется Астро-космическим центром ФИАН им. П.Н. Лебедева и НПО им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах. Данная работа частично поддержана программой фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН (ОФН-17 “Активные процессы в галактических и внегалактических объектах”) и грантами РФФИ 13-02-12103, 13-02-00460. Используя при анализе антенных измерений наблюдения на ра-

диотелескопе РАТАН-600 (САО РАН) были проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.518.11.7062 и 14.518.11.7054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хартов В.В.* Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестн. “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2011. № 3. С. 3–10.
2. *Кардашев Н.С., Александров Ю.А., Андреев В.В. и др.* РадиоАстрон (проект *Спектр-Р*) – радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // Вестн. “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2011. № 3. С. 11–18.
3. *Кардашев Н.С., Александров Ю.А., Андреев В.В. и др.* РадиоАстрон (проект *Спектр-Р*) – радиотелескоп много больше Земли. Наземный сегмент и основные направления научных исследований // Вестн. “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2011. № 3. С. 19–30.
4. *Авдеев В.Ю., Алакоз А.В., Александров Ю.А. и др.* Космическая миссия “Радиоастрон”. Первые результаты // Вестн. “НПО им. С.А. Лавочкина”. 2012. № 3. С. 4–21.
5. *Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В. и др.* “РадиоАстрон” – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. 2013. Т. 90. С. 179–222.
6. *Radioastron User Handbook*. <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf>
7. *Краус Д.Д.* Радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1973.
8. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973
9. *Кюн Р.* Микроволновые антенны. Пер с англ. М.: Судостроение, 1967.
10. *Цейтлин А.М.* Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976.