УДК 524.35

#### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

### Р.М. МАРТИРОСЯН, А.Г. ГУЛЯН, Г.А. ПИРУМЯН, С.А. САРКИСЯН Г.С. АВЕТИСЯН

#### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-13 ИПА РАН

Приведены результаты фокусировки и измерения параметров радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН в пункте назначения в диапазонах S, X, Ка по эталонному космическому радиоисточнику "Кассиопея-А", согласно разработанной в ИРФЭ НАН РА программе/методике, для высокоточного и оперативного обеспечения Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) данными о координатах полюса, Всемирном времени и для связи с международной сетью РСДБ (Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами) и другими международными службами.

Ключевые слова: радиотелескоп, юстировка, шумовая температура.

Введение. Глобальная навигационная спутниковая система разработана по заказу Министерства обороны СССР/РФ в рамках федеральной целевой программы "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы" и является одной из двух функционирующих на сегодня систем глобальной спутниковой навигации. ГЛОНАСС предназначена для оперативного навигационно-временного обеспечения неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования. Доступ к гражданским сигналам ГЛОНАСС в любой точке земного шара предоставляется российским и иностранным потребителям на безвозмездной основе и без ограничений.

Основой системы должны являться 24 спутника, движущихся над поверхностью Земли в трёх орбитальных плоскостях с наклоном орбитальных плоскостей  $64.8^{\circ}$  и высотой  $19100 \ \kappa m$ . Принцип измерения аналогичен американской системе навигации NAVSTAR GPS. Основное отличие от системы GPS в том, что спутники ГЛОНАСС в своём орбитальном движении не имеют резонанса (синхронности) с вращением Земли, что обеспечивает им большую стабильность. Таким образом, группировка КА ГЛОНАСС не требует дополнительных корректировок в течение всего срока активного существования.

Целью выполнения работы является разработка программы/методики для фокусировки и исследования характеристик радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН (Институт прикладной астрономии Российской академии наук), а также проведение измерений на пунктах назначения.

Объектом исследования является построенный по двухзеркальной схеме с кольцевым первичным фокусом трехдиапазонный радиотелескоп РТ-13 ИПА РАН, на котором установлена радиоастрономическая приемная система (РПС) с криостатируемым трехдиапазонным облучателем и малошумящими усилителями

(МШУ). Рабочие диапазоны частот радиотелескопа: S - (2,2...2,6)  $\Gamma \Gamma u$ , X - (7,0...9,5)  $\Gamma \Gamma u$  и Ka - (28...34)  $\Gamma \Gamma u$ .

1. Программа и методика определения оптимального положения контррефлектора (фокусировка). Оптимальное положение контррефлектора радиотелескопа (фокусировка) и величины смещения фазовых центров облучателя в S-, X- и Kа-диапазонах волн относительно оптимального положения контррефлектора ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ ) определялись с помощью программы слежения космического радиоисточника путем выбора положения контррефлектора, обеспечивающего соответствие формы диаграммы направленности (ДН) расчетной (достижением максимального приращения выходного сигнала). Фокусировка проводилась при угле места 45°. Исследование характеристик радиотелескопа проводилось после его фокусировки. В табл.1 приведены поправки от отсчетного ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ ) положения контррефлектора.

Таблииа 1

$\mathcal{N}_{2}$	Название характеристик	Ед. изм.	Величина
	Смещение от отсчетного ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$ )		
1	положения контррефлектора	мм	
2	$\Delta { m x}_{ m s}$	мм	3
3	$\Delta y_{ m s}$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	-2
4	$\Delta z_{ m s}$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	2
5	$\Delta { m x}_{ m x}$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	-1
6	$\Delta y_{x}$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	3
7	$\Delta z_{\scriptscriptstyle X}$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	2
8	$\Delta \mathrm{x}_{\mathrm{k}}$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	0
9	$\Delta y_k$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	2
10	$\Delta z_k$	$\mathcal{M}\mathcal{M}$	1
11	$\Delta \overline{x}$	мм	0,7
12	$\Delta \overline{y}$	мм	1
13	$\Delta_z^-$	мм	1,7

# **2.** Программа исследования характеристик радиотелескопа РТ-13 ИПА РАН. Измерения проводились в обсерватории ИПА РАН "Бадары" при слабой облачности и средней температуре $-20^{0}C$ в период с 26.11.2014 по 06.12.2014 гг. по эталонному радиоисточнику "Кассиопея-А" со следующими характеристиками:

- прямое восхождение  $\alpha_{1950,0} = 23^h 21^m 10^s_{,} 2$ ;
- склонение  $\delta_{1950.0} = 58^{\circ} 32' 40'' 5.$  (1)

Значения экваториальных координат для данной эпохи M вычисляются по формулам [1]

$$\alpha_{2014} = \alpha_{1950,0} + (2014 - 1950) \times 2^{s}_{,} 70;$$

$$\delta_{2014} = \delta_{1950,0} + (2014 - 1950) \times 19^{"}_{,} 761;$$

$$190$$
(2)

а значения плотности потока для данной эпохи - по формулам [2]

$$\log F_{1980,0} = 5,745 - 0,770 \log f,$$

$$F_{2014} = F_{1980,0} [1 - (0,0097 - 0,0003 \log f)]^{2014 - 1980},$$
(3)

где f - частота в гигагерцах. В табл. 2 представлены значения плотностей потоков на рабочих частотных диапазонах.

Таблица 2

Диапазон	S	$\mathbf{X}_1$	$X_2$	$X_3$	$Ka_1$	$Ka_2$	$Ka_3$
ГГц	2,4	7,0	8,25	9,5	28,0	31,0	34,0
$F_{2014}10^{-26}$ , $Bm/M^2$	950	430	380	340	150	141	128

- 3. Определение шумовой температуры антенны по всему угловому разрезу с шагом  $\Delta h=10^{\circ}$ .
  - 3.1. Записываем выходной уровень при отключенном приемнике (РПС).
  - 3.2. Включаем РПС и записываем выходной уровень Т ша.
- 3.3. Включаем внутренний генератор шума (ГШ) и записываем выходной уровень  $T_{IIIA} + T_{\Gamma III}$ .
  - 3.4. По показанием 3.1, 3.2 и 3.3 определяем  $T_{\text{IIIA}}$ .
  - 3.5. Пункты 3.1-3.4 выполняем в S-, X-, Ка- диапазонах (табл. 3).

Таблица 3 Диапазон S 60° 50° 40° 10°  $70^{\rm o}$ 30° Н (град)  $T_{IIIA}(K)$ 67 79 92 | 107 | 122 | 137 147 Диапазон X 60° 50° Н (град)  $80^{\rm o}$  $70^{\rm o}$ 40° 20°  $10^{o}$  $\mathrm{T_{IIIA}}(K)$ 63 78 98 123 143 163 173 183 Диапазон Ка 60° Н (град)  $80^{\rm o}$  $70^{\rm o}$ 50°  $40^{\rm o}$ 30°  $20^{\,\mathrm{o}}$  $10^{\rm o}$  $T_{IIIA}(K)$ 196 204 216 218 231 241 256 273

На рис. 1, 2 приведены угловые зависимости шумовой температуры антенны в диапазонах X и Ka.

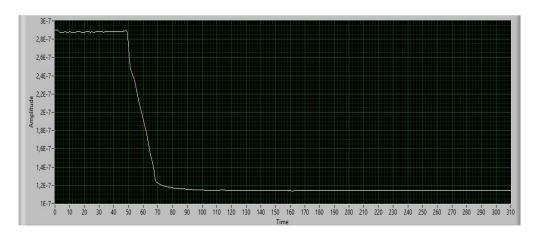


Рис. 1. Разрез атмосферы в диапазоне Х

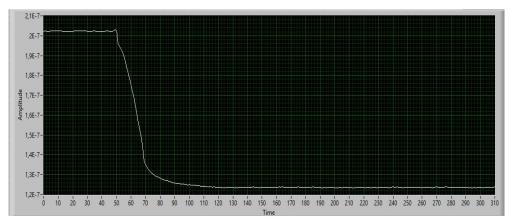


Рис. 2. Разрез атмосферы в диапазоне Ка

# 4. Измерение смещений электрической оси антенны от геометрической по всему угловому разрезу с шагом $\Delta h$ =10°.

- 4.1. Устанавливаем антенну на программу слежения источника "Кассиопея А" с нулевыми поправками по углу и азимуту.
- 4.2. Изменением программных величин азимута и угла места добиваемся максимального приращения выходного сигнала источника.
  - 4.3. Пункты 4.1-4.2 выполняем в S-, X-, Ka диапазонах (табл. 4).

		Таблица 4
Диапазон S	Диапазон Х	Диапазон Ка
$\Delta h_S = 30'$	$\Delta h_X = 26'$	$\Delta h_{Ka} = 20'$
$\Delta A_s = -14'$	$\Delta A_{\rm X} = -10'$	$\Delta A_{Ka} = -15'$

- 5. Измерение ширины диаграмм направленности антенны, их зависимость от угла места ( $\Delta h=10^{\circ}$ ) в S-, X-, Kа - диапазонах.
- 5.1. Радиотелескоп устанавливаем на программу слежения траектории источника "Кассиопея А" и с учетом поправок ДА, Д и рефракции достигаем максимального уровня выходного сигнала.
- 5.2. Останавливаем движение антенны по азимуту, определяем временной отрезок между значениями выходных сигналов Тист.макс и 0,5 Тист.макс в единицах времени ( $\Delta t_{0.5}$ ) и находим половину ширины кривой прохождения по формуле

$$\varphi_{0,5 \text{ изм}} = 15 * \Delta t_{0,5} * \cos \delta_m.$$

Ширину ДН азимутальной плоскости вычисляем по формуле

$$\varphi_{0,5} = 2\sqrt{\varphi_{0,5 \text{ изм}}^2 - 2(\ln 2)R^2},$$

где  $\delta_m = \delta_{1950,0} + (M - 1950) \times 19_{,}^{"}761 = 58^{\circ}53'40''$ .

5.3. С учетом п.4.1 останавливаем движение антенны по угломестной координате, определяем временной отрезок между значениями выходных сигналов  $T_{\text{ист.макс}}$  и  $0.5T_{\text{ист.макс}}$  в единицах времени ( $\Delta t_{0.5}$ ) и находим половину ширины кривой прохождения по формуле

$$\theta_{0,5 \text{ \tiny M3M}} = \Delta t_{0,5} 15 \cos \delta_m.$$

Ширину ДН направленности в угломестной плоскости вычисляем по формуле

$$\theta_{0,5} = 2\sqrt{\theta_{0,5 \text{ изм}}^2 - 2(\ln 2)R^2}$$

 $\theta_{0,5} \,= 2 \sqrt{\theta_{0,5\;\text{изм}}^2 \,- 2(\ln 2) R^2} \,,$  где  $\delta_m = \delta_{1950,0} + \,$  (M - 1950)  $\times$  19 $_.^{\prime\prime}$  761 = 58 $^0$  53 $^\prime$  40 $^{\prime\prime}$ ;  $R=2^\prime$ 15 $^{\prime\prime}$  - радиус диска радиоисточника "Кассиопея - А".

5.4. Пункты 5.1-5.3 выполняем в S-, X-, Ka- диапазонах (табл. 5).

Диапазон S									
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	
$\theta_{0,5}$	31'50"	32'00"	32'05"	32'15"	32'20"	32'25"	32'25"	32'30"	
Φ0,5	31'20"	31'25"	31'32"	31'36"	31'40"	31'50"	31'55"	32'00"	

#### Диапазон Ка

h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$\theta_{0,5}$	2'17"	2' 19"	2'20"	2'23"	2'25"	2'28"	2'30"	2'30"
	2'03"	2'05"	2' 08"	2' 11"	2' 14"	2' 17"	2'03"	2' 20"
	1'52"	1'53"	1'55"	1'58"	2'00"	2'03"	2'05"	2'08"
φ <sub>0,5</sub>	2'16"	2'18"	2'19"	2'22"	2'24"	2'25"	2'27"	2'28"
	2'03"	2'05"	2'08"	2'11"	2'14"	2'16"	2'17"	2'18"
	1'45"	1'46"	1'47"	1'50"	1'52"	1'54"	1'56"	1'58"

#### Диапазон Х

h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$\theta_{0,5}$	9'04"	9'08"	9'10"	9'12"	9'15"	9'25"	9'26"	9'28"
	7'42"	7'44"	7'50"	7' 54"	7'58"	8'00"	8'0 4"	8' 10"
	6'41"	6'47"	6'52"	6'55"	7'00"	7'05"	7' 10"	7' 15"
φ <sub>0,5</sub>	9'03"	9'08"	9'12"	9' 15"	9'20"	9'24"	9'28"	9'30"
	7'35"	7'39"	7'43"	7'48"	7'51"	7'55"	7'58"	8'00"
	6'37"	6'40"	6'43"	6'47"	6'50"	6'55"	6'58"	7'00"

#### 6. Измерение эффективной площади антенны.

- 6.1. Включаем РПС, выбираем требуемый частотный диапазон и направляем на "холодное" небо близ возможно высокой угломестной координаты траектории радиоисточника.
  - 6.2. Включаем ГШК и измеряем величину выходного сигнала АС (Тгшк).
- 6.3. Выходим на программу радиоисточника с учетом поправок контррефлектора,  $\Delta A$ ,  $\Delta h$  и измеряем величину выходного сигнала AC ( $T_{\text{ист}}$ ).
  - 6.5. Эффективную площадь вводим по следующей формуле [3]:

$$A_{9\varphi\varphi} = g \frac{2KT_{\text{ИСТ.}}}{F},$$

где  $A_{3\varphi\varphi}$  - эффективная площадь антенны;  $K=1,38.10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана; F - спектральная плотность потока излучения радиоисточника ( $Bm/m^2$   $\Gamma u$ ); g - безразмерная величина, которая учитывает соизмеримость угловых размеров источника и ширины антенны и вычисляется из выражения

$$g = \left\{ \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{R}{0.6\theta_{0,5}} \right)^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{R}{0.6\theta_{0,5}} \right)^4 \right] \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{R}{0.6\varphi_{0,5}} \right)^2 + \frac{1}{6} \left( \frac{R}{0.6\varphi_{0,5}} \right)^4 \right] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

R – угловой размер радиоисточника.

- 6.6. Выполняем пункты 6.1 6.5 для убывающей угломестной координаты с шагом  $\Delta h$ =10°.
  - 6.7. Производим операции по пп. 5.1-5.6 в диапазонах "Х" и "Ка".

По результатам измерений параметров, указанных в пп. 5.1-5.7, по формулам

КИП=
$$A_{\text{эфф}}/A_{\text{геом}}$$
, ЭПППС = 2К $T_{\text{сист}}/A_{\text{эфф}}$ 

определяем зависимость коэффициента использования поверхности (КИП) и эквивалентной плотности потока приемной системы (ЭПППС) от угла места (табл. 6).

Таблица 6

									,	
				Диат	1азон S					
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10	) <sup>0</sup>	
Аэфф.	90	89	87	87	86	85	84	84	ļ.	
КИП	0,68	0,67	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63	0,	63	
SEFD	1983	2371	2844	3305	3767	4294	4680	49	1998	
Диапазон Х										
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10	) <sup>0</sup>	
$A_{9\varphi\varphi}$	86	85	85	84	83	82	81	80	)	
КИП	0,70	0,69	0,69	0,67	0,67	0,66	0,66	0,0	65	
SEFD	1940	2262	2842	3673	4270	4941	5244	56	532	
				Диап	азон Ка					
h	80°	70°	60°	50°	40 °	30°	20°		10°	
$A_{9\varphi\varphi}$	68	67	66	66	65	63	61		60	
КИП	0,51	0,5	0,5	0,5	0,49	0,47	0,46		0,45	
SEFD	7686	8160	8640	8720	9429	10255	11130	)	12044	

#### 7. Измерения уровней ближних боковых лепестков

- 7.1. Радиотелескоп с учетом всех поправок устанавливаем на программу слежения траектории радиоисточника с временным опережением не менее шестикратной ширины главного лепестка, обеспечивающую прохождение источника через главный и ближайшие боковые лепестки ДН.
- 7.2. Останавливаем антенную систему (AC) по обеим координатам и измеряем величину выходного сигнала AC ( $T_{\text{III,сист}}$ ).
- 7.3. Для калибровки AC включаем ГШК и измеряем величину выходного сигнала AC ( $T_{\text{гкш}}$ ).

- 7.4. При прохождении радиоисточника через боковые лепестки ДН, при необходимости, с учетом динамического диапазона АС выбираем необходимое усиление и измеряем величины выходных сигналов АС ( $T_{\text{бок. макс.л.}}$ ,  $T_{\text{бок. макс.л.}}$ ).
- 7.5. По выходным значениям  $T_{\text{бок. макс.л}}$  , $T_{\text{бок. макс.п}}$  и  $T_{\text{ист. макс}}$  (рис. 3) определяем уровни боковых лепестков.
- 7.6. Производим операции по пп. 7.1- 7.6 для частотных диапазонов "X" и "Ka" (табл. 7).

Таблица 7

	Диапазон S										
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°			
Бок.л.	25	24	23,5	23	22,5	22	22	21			
Бок.п.	19	18,8	18,5	18	17,4	17	16,5	16			
Диапазон Х											
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°			
Бок.л.	24	23	22,5	22	21,5	21	20	19			
Бок.п.	17,5	17,3	17	16,5	16,1	15,7	15,2	15			
Диапазон Ка											
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°			
Бок.л.	21	20,5	20	20	19	18,5	18	17			
Бок.п.	16	16,7	16,2	16	15,5	15	14,5	14			

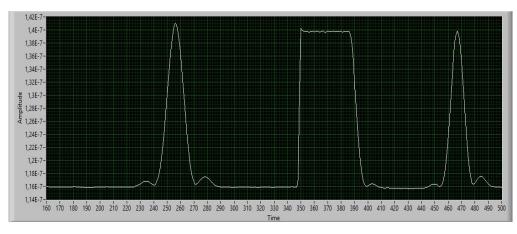


Рис. 3. Сканирование источника "Кассиопея-А"

#### Выводы

- **1.** Значения измеренных характеристик РТ-13 в основном соответствуют ожидаемым.
- **2.** Параметры РТ-13 измерялись в дневное время суток и при температурах окружающей среды -20°C и ниже. С целью уменьшения воздействия солнечного излучения следует измерения повторить при умеренных температурах и в ночное время суток.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Астрономический ежегодник (постоянная часть).
- 2. **Baars J. W., Genzel R., Payting-Toth I. I. K., Witzel** // Astrophys A.- 1977.- V.61.- P. 99.
- 3. Цейтлин Х.М. Антенная техника в радиоастрономии.-М.: Сов. радио, 1976.

Институт Радиофизики и электроники НАН РА. Материал поступил в редакцию 12.03.2015.

#### Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ, Հ.Ա. ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ, Ս.Ա. ՄԱՐԳՍՅԱՆ, Գ.Ս. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

#### РТ-13 ИПА РАН ՌԱԴԻՈԴԻՏԱԿԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՉԱՓՈՒՄԸ

Ներկայացված են բևեռի կոորդինատների և Համաշխարհային ժամանակի ձշգրիտ տվյալներով ԳԼՈՆԱՍՍ համակարգի ապահովմանը, ինչպես նաև միջազգային համանման ցանցերին միանալու հնարավորությանը միտված, ՀՀ ԳԱԱ ՌՖԷԻ-ում մշակված ծրագիր/մեթոդի հիման վրա «Կասիոպեա-Ա» կոսմիկական Էտալոնային ռադիոաղբյուրի միջոցով հաձախային Տ, X. և Ka տիրույթներում իրականացված ՌԱ-13 ԿԱԻ ՌԳԱ ռադիոդիտակի ձշտադրման և բնութագրերի չափման արդյունքները։

**Առանցքային բառեր.** ռադիոդիտակ, ձշտադրում,աղմկային ջերմաստիձան։

## R.M. MARTIROSYAN, A.G. GULYAN, H.A. PIRUMYAN, S.A.SARGSYAN, G.S. AVETISYAN

#### MEASURING THE RADIOTELESCOPE PARAMETERS

The results of focusing and measurements of the parameters of IAA RAS (Institute of Applied Astronomy of Russian Academy of Sciences) radio telescope RT-13 in the ranges of S, X, Ka based on the space radiation source of "Kassiopeya-A" which is a program/technique developed in IRPhE NAS RA (Institute of Radiophysics and Electronics National Academy of Sciences of Republic of Armenia), as well as the results of high-precision data of pole coordinates and World time for providing GLONASS and making connections with the international VLBI (Very Long Baseline Interferometry) -network and other international services are introduced.

Keywords: radio telescope, adjustment, noise temperature.