

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕЛЕСКОПА RT-13 ИПА РАН

**Радик Мартиросян¹, Альберт Гулян², Гамлет Пирумян²,
Маргар Адибекян³**

¹Президент Национальной Академии Наук Армении – Армения

²Институт Радиофизики и Электроники НАН Армении – Армения

³Региональная служба сейсмической защиты “ГНО МЧС Республика Армения – Армения
e-mail: adibekyan@yahoo.com

Ключевые слова: радиодисточник, радиотелескоп, антенна, лепесток, температура.

Абстракт: приведены результаты фокусировки и измерений характеристик радиотелескопа RT-13 ИПА РАН на пункте назначения, в диапазонах S, X, Ka по эталонному космическому радиодисточнику “Кассиопея - А”, по разработанной в ИРФЭ программой/методикой. для высокоточного и оперативного обеспечения системы ГЛОНАСС данными о координатах полюса и Всемирном времени и для связи с международной РСДБ-сетью и другими международными службами.

1. Введение

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) 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 км. 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 RT-13 ИПА РАН (Санкт Петербург, РФ) а так же проведение измерений на пунктах назначений.

Объектом исследования является построенный по двухзеркальной схеме с кольцевым первичным фокусом трехдиапазонный радиотелескоп RT-13 ИПА РАН, на котором установлена радиоастрономическая приемная система (РПС) с криостатируемым трехдиапазонным облучателем и малошумящими усилителями (МШУ). Рабочие диапазоны частот радиотелескопов: S – (2,2–2,6) ГГц, X – (7,0–9,5) ГГц и Ka – (28–34) ГГц.

1. Программа и методика определения оптимального положения контррефлектора (фокусировка)

Оптимальное положение контррефлектора радиотелескопа (фокусировка) и величины смещения фазовых центров облучателя в S, X и Ka-диапазонах волн относительно оптимального положения контррефлектора ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) определялись на программе слежения космического радиодисточника, путем выбора положения контррефлектора,

обеспечивающего соответствие формы ДН расчетной (достижением максимального приращения выходного сигнала). Фокусировка проводилась при угле места 45° . Исследование характеристик радиотелескопа проводилось после его фокусировки. В таб.1 приведены усредненные по всем диапазон поправки от отсчетного ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) положения контррефлектора.

Табл. 1.

Название характеристик	Ед. изм.	Величина
Смещение от отсчетного ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0$) положения контррефлектора	мм	
$\bar{\Delta x}$	мм	0,7
$\bar{\Delta y}$	мм	1
$\bar{\Delta z}$	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°C , в период с 26.11.2014 по 06.12.2014 г.г. 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 М вычисляются по формулам [1]:

$$\begin{aligned} \alpha_{2014} &= \alpha_{1950,0} + (2014 - 1950) \times 2^s 70 \\ \delta_{2014} &= \delta_{1950,0} + (2014 - 1950) \times 19'' 761 \end{aligned} \quad (2)$$

значения плотности потока для данной эпохи вычисляются по формулам [2]:

$$\begin{aligned} \log F_{1980,0} &= 5,745 - 0,770 \log f \\ F_{2014} &= F_{1980,0} [1 - (0,0097 - 0,0003 \log f)]^{2014-1980} \end{aligned} \quad (3)$$

где f - частота в гигагерцах.

В табл. 2 представлены значения плотностей потоков на рабочих частотных диапазонах.

Табл. 2.

Диапазон	S	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
$F_{2014} 10^{-26}$ Вт/м 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 отключенной радиоприемной системе (РПС).
- 3.2. Включаем РПС и записываем выходной уровень $T_{\text{ш.А}}$.
- 3.3. Включаем ГШ, и записываем выходной уровень $T_{\text{ш.А}} + T_{\text{ГШ}}$.
- 3.4. По показаниям 3.1, 3.2 и 3.3 определяем $T_{\text{ш.А}}$.
- 3.5. П.п. 3.1–3.4 выполняем в S, X, Ka-диапазонах.

Результаты измерений приведены в (Табл. 3).

Табл. 3

Диапазон S								
h(грд)	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
T _{ША} (K°)	67	79	92	107	122	137	147	157

Диапазон X								
h(грд)	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
T _{ША} (K°)	63	78	98	123	143	163	173	183

Диапазон Ka								
h(грд)	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
T _{ША} (K°)	196	204	216	218	231	241	256	273

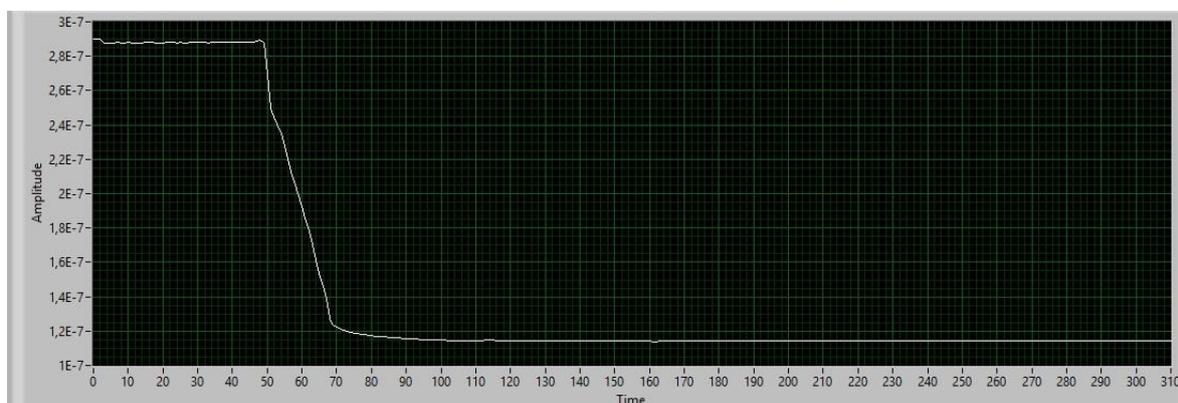


Рис. 1. Разрез атмосферы в диапазоне X

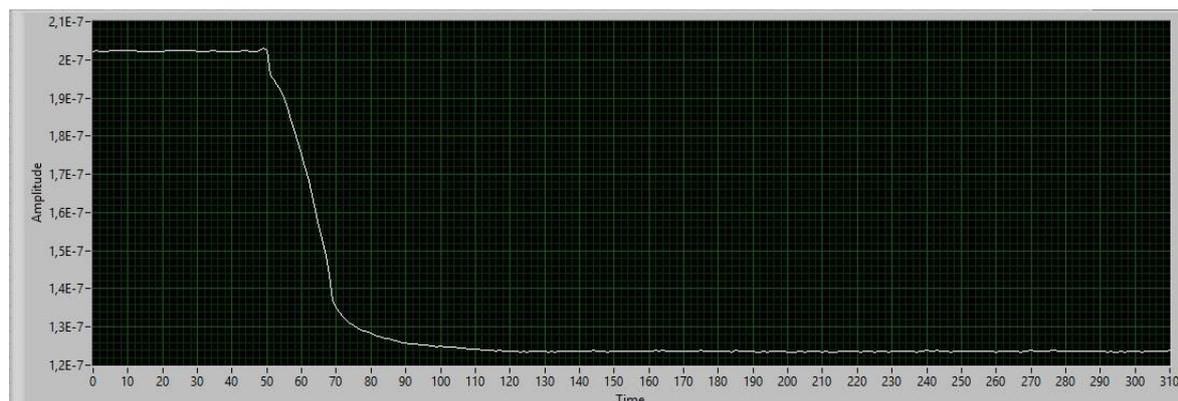


Рис. 2. Разрез атмосферы в диапазоне Ka

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

4.1. Выставляем антенну на программу слежения источника “Кассиопея А” с нулевыми поправками по углу и по азимуту.

4.2. С изменением программных величин азимута и угла места добиваемся максимального приращения выходного сигнала источника.

4.3. П.п. 4.1–4.2. выполняем в S, X, Ka-диапазонах.

Результаты измеренн приведены в (Табл. 4).

Табл. 4

диапазон S	диапазон X	диапазон Ka
$\Delta h_S = 30'$	$\Delta h_X = 26'$	$\Delta h_{Ka} = 20'$
$\Delta A_S = -14'$	$\Delta A_X = -10'$	$\Delta A_{Ka} = -15'$

5. Измерений ширин диаграмм направленности антенны, их зависимость от угла места ($\Delta h = 10^\circ$) в S, X, Ka диапазонах

5.1. Радиотелескоп установим на программу слежения траектории источника “Кассиопея А”, с учетом поправок ΔA , Δh и рефракции достигнуть максимального уровня выходного сигнала.

5.2. Остановим движение антенны по азимуту, 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:

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

Ширину диаграммы направленности в азимутальной плоскости вычислить по формуле:

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

5.3. С учетом п. 5.1., остановить движение антенны по угломестной координате и определить временной отрезок между значениями выходных сигналов $T_{\text{ист.макс}}$ и $0,5T_{\text{ист.макс}}$ в единицах времени ($\Delta t_{0,5}$) и найти половину ширины кривой прохождения по формуле:

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

Ширину диаграммы направленности в угломестной плоскости вычислить по формуле:

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

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

$R = 2' 15''$ – радиус диска радиоисточника “Кассиопея - А”.

5.4. П.п. 5.1–5.3. выполняем в S, X, Ka-диапазонах.

Результаты измерений приведены в (Табл. 5).

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"
$\varphi_{0,5}$	31' 20"	31' 25"	31' 32"	31' 36"	31' 40"	31' 50"	31' 55"	32' 00"

Диапазон X								
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' 04"	8' 10"
	6' 41"	6' 47"	6' 52"	6' 55"	7' 00"	7' 05"	7' 10"	7' 15"
$\varphi_{0,5}$	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"

Диапазон Ka								
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"
$\varphi_{0,5}$	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"

6. Измерение эффективной площади антенны

6.1. Включаем РПС, выберем требуемый частотный диапазон и антенну направляем на "холодное" небо, близ возможно высокой угломестной координаты траектории радиоисточника.

6.2. Включаем ГШК и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{гшк}$).

6.3. Выходим на программу радиоисточника с учетом поправок контррефлектора, ΔA , Δh и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{ист}$).

6.5. Эффективная площадь вводится следующей формулой [3]:

$$A_{эфф.} = g \frac{2KT_{ист.}}{F},$$

где $A_{эфф.}$ - эффективная площадь антенны,

$K=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана,

F - спектральная плотность потока излучения радиоисточника (Вт/м² Гц).

g - безразмерная величина, которая учитывает соизмеримость угловых размеров источника и ширины диаграммы направленности антенны и вычисляется из выражения.

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

$$КИП = A_{эфф.}/A_{геом.}, \quad SEFD = 2KT_{сист}/A_{эфф}$$

Величины коэффициента использования поверхности (КИП) и эквивалентной плотности потока приемной системы (SEFD) от угла места во всех диапазонах приведены в (Табл. 6).

Табл. 6

Диапазон S								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$A_{эфф.}$	90	89	87	87	86	85	84	84
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	4998

Диапазон X								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$A_{эфф.}$	86	85	85	84	83	82	81	80
КИП	0,70	0,69	0,69	0,67	0,67	0,66	0,66	0,65
SEFD	1940	2262	2842	3673	4270	4941	5244	5632

Диапазон Ka								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$A_{эфф.}$	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 всеми поправками установим на программу слежения траектории радиоисточника с временным опережением не менее шестикратной ширины главного лепестка, обеспечивающий прохождение источника через главный и ближайшие боковые лепестки диаграммы направленности.

7.2. Остановим АС по обеим координатам и измеряем величину выходного сигнала АС ($T_{ш.сист.}$).

7.3. При прохождении радиоисточника через боковые лепестки диаграммы направленности, при необходимости, с учетом динамического диапазона АС выбираем необходимое усиление и измеряем величины выходных сигналов АС ($T_{бок. макс.л.}$, $T_{бок. макс.п.}$).

7.4. По выходным значениям $T_{бок. макс.л.}$, $T_{бок. макс.п.}$ и $T_{ист. макс.}$ (Рис.3) определяем уровни боковых лепестков.

7.5. Производим операции по п.п 7.1. – 7.4. для частотных диапазонов “Х” и “Ка”.

Результаты измеренн приведены в (Табл. 7).

Табл. 7

Диапазон S								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
Бок.л. дБ	25	24	23,5	23	22,5	22	22	21
Бок.п. дБ	19	18,8	18,5	18	17,4	17	16,5	16

Диапазон X								
h	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
Бок.л. дБ	24	23	22,5	22	21,5	21	20	19
Бок.п. дБ	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. дБ	21	20,5	20	20	19	18,5	18	17
Бок.п. дБ	16	16,7	16,2	16	15,5	15	14,5	14

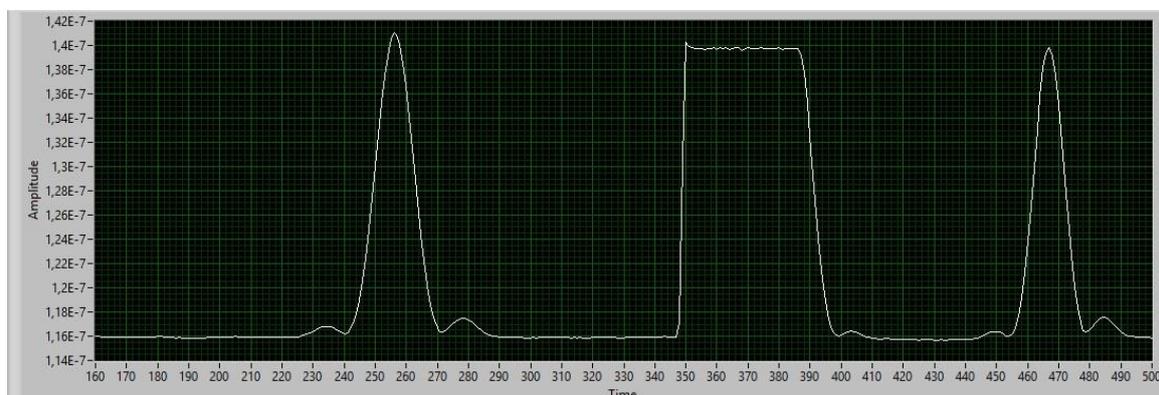


Рис. 3. Сканирование источника “Кассиопея-А”

9. Выводы

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

Литература:

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