

Проект "РадиоАстрон". Калибровка космического телескопа в полете в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в 2015-2018 гг

© Ю. А. Ковалев¹, В. И. Васильков¹, А. Н. Ермаков¹, Е. Н. Виняйкин²,
М. В. Попов¹, В. А. Согласнов¹, М. Г. Ларионов¹, Н. Я. Николаев¹,
М. С. Бургин¹, У. У. Ковалев^{1,3,4}, П. А. Войцик¹, М. М. Лисаков^{4,1},
А. М. Кутькин^{5,1}, А. В. Алакоз¹, Н. Н. Шахворостова¹, К. Г. Белоусов¹,
А. В. Коваленко⁶

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

²Научно-исследовательский радиофизический институт, г.Нижний Новгород, Россия

³Московский физико-технический институт, г.Долгопрудный, Россия

⁴Институт радиоастрономии им. Макса Планка, Бонн, Германия

⁵Институт радиоастрономии (ASTRON), Двингелоо, Нидерланды

⁶Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, г.Москва, Россия

Представлены результаты мониторинговых радиометрических измерений, выполненных в юстировочных сеансах с помощью космического радиотелескопа (КРТ) относительно первичных калибраторов по потоку -- остатков Сверхновых Кассиопея-А и Крабовидная туманность. Данные обработаны новой автоматизированной системой, предназначенной для обработки и калибровки параметров КРТ по данным юстировочных сеансов. Для каждого диапазона получены эквивалентные спектральные плотности потока излучения системы (SEFD) и калибровочные амплитуды восьми внутренних генераторов шумового сигнала (основные и резервные, в единицах Ян) для использования при калибровках наземно-космического интерферометра в каналах правой и левой круговых поляризаций. Анализ показывает, что в пределах погрешности измерений все калибровки были стабильны в течение этих 4 лет, а температуры собственных шумов КРТ во всех диапазонах близки к измеренным в 2011-2013 гг.

Ключевые слова: РадиоАстрон, космический телескоп, основные параметры антенн, калибровка КРТ, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, телеметрия, автоматизация обработки данных.

Введение

Космический телескоп проекта "РадиоАстрон" успешно работал на орбите с июля 2011 по январь 2019 года в двух основных режимах работы: как одиночный телескоп и как космический орбитальный элемент наземно-космического радиоинтерферометра. Наблюдения в режиме одиночного телескопа обеспечивали мониторинг до 600 контрольных параметров Бортового Комплекса Научной Аппаратуры (БКНА) и телескопа, калибровку КРТ по потоку и патрулирование его основных антенных параметров. Сбор этих данных осуществлялся с помощью штатной бортовой телемет-

рической системы космического аппарата "Спектр-Р", временно запоминался в бортовой памяти и в удобное время передавался на Землю через полутораметровую параболическую связную антенну. Дальнейшая экспресс-обработка и анализ телеметрических данных выполнялись на Земле с помощью набора специализированных программ, разработанных в НПО им. С.А. Лавочкина и АКЦ ФИАН, что позволяло оперативно решать возникающие вопросы практической эксплуатации БКНА и КРТ в целом (подробнее см. [1-3]).

Калибровка телескопа необходима для измерений основных антенных параметров КРТ в юстировочных сеансах, а также для калибровки КРТ в составе наземно-космического интерферометра. При этом результаты этих двух видов калибровок, строго говоря, не "взаимозаменяемы" по целому ряду причин. Для калибровки КРТ в режиме работы одиночного телескопа можно использовать как измерения эквивалентной спектральной плотности потока шумового излучения системы КРТ в Янских (SEFD) *относительно первичных астрономических калибраторов*, так и эквивалентную спектральную плотность излучения ГШ, Ян (*измеренную по тем же калибраторам*). Однако при калибровке КРТ как элемента наземно-космического РСДБ практически единственным надежным "вторичным" внутренним калибратором оказывается только ГШ, относительно которого можно откалибровать или проконтролировать калибровку собственных шумов КРТ *как элемента космического РСДБ* в любой момент эксперимента. В этом случае собственные шумы КРТ при РСДБ измерениях внегалактических объектов могут быть иные, чем при измерении в направлении на первичные калибровочные объекты (обычно расположенные вблизи плоскости Галактики и имеющие дополнительный вклад от галактического фона).

Начиная с первых юстировочных и РСДБ-измерений за основной внутренний калибровочный ГШ в каждом поляризационном канале выбирался обычно один-два ГШ с "привязкой" его по потоку к Кассиопее-А. В данной работе мы представляем результаты массовой калибровки как собственных шумов КРТ в режиме одиночного телескопа, так и всех внутренних ГШ (основных и резервных), которые тоже могут быть использованы при калибровке КРТ в режиме интерферометра. Все измерения выполнены относительно первичных астрономических калибраторов Кассиопеи-А и Крабовидной туманности в юстировочных (калибровочных) сеансах. Это позволит как проверить и уточнить ранее выполненные калибровки, так и предоставит новые, более широкие возможности калибровки КРТ для продолжающихся работ.

Описание проекта "РадиоАстрон", а также первые результаты калибровки и измерений основных антенных параметров КРТ и их использования представлены в работах [1-2]. С основными публикациями по проекту "РадиоАстрон" можно ознакомиться на сайте АКЦ ФИАН [3].

Измерение, обработка и результаты

Для массовой работы с калибровочными данными мы отобрали из архива АКЦ ФИАН все измерения Кассиопеи-А и Крабовидной туманности, выполненные в диапазонах 6.2., 18 и 92 см в каналах левой и правой круговых поляризациях в течение 4 заключительных лет работы КРТ -- с 2015 по 2018 год. Спектральные плотности потока излучения этих источников как первичных астрономических калибраторов взяты по-прежнему из работы [4] с учетом нового анализа [5]. Используется новая система КАЛИБР-КРТ (CALIBR-SRT) автоматизированной обработки телеметрических калибровочных данных, полученных с радиометрических выходов интерферометрических приемников в юстировочных сеансах.

Обработанные результаты суммированы на Рис. 1-4 и в Таблицах 1-3. Они представляют собой данные мониторинга во времени для значений амплитуд внутренних калибровочных генераторов шумового сигнала (ГШ, по восемь ГШ в каждом поляризованном канале каждого диапазона) и собственных шумов системы КРТ. Результаты откалиброваны в единицах эквивалентной спектральной плотности потока излучения (в Янских). Для удобства и наглядности на всех рисунках и в таблицах эти данные представлены в эквивалентной антенной температуре, приведенной ко входу телескопа (в Кельвинах). "Пересчет" из плотности потока в температуры выполнен с помощью известных значений усиления антенны, --- как и прежде, полагая их фиксированными и равными следующим значениям: 78.86, 67.32 и 92.00 Ян/К для диапазонов 6.2, 18 и 92 см, соответственно, -- см. п. 6 Таблицы 2 в работе [2].

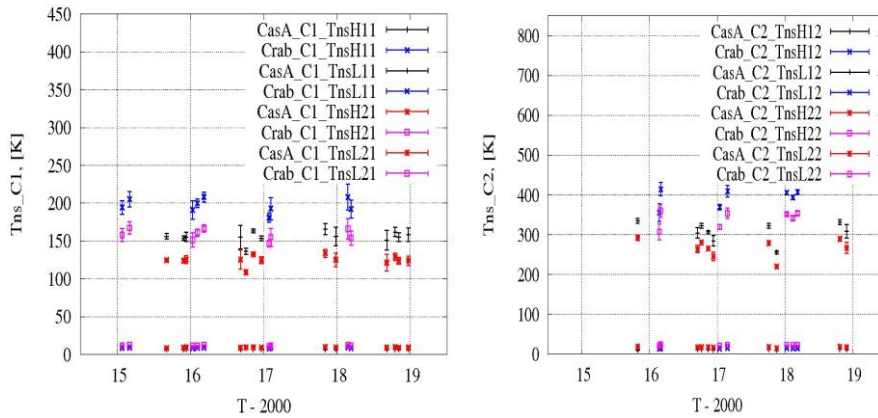


Рис. 1. Антенная температура Tns калибровочных генераторов шума (H1, L1 и H2, L2) по измерениям относительно Кассиопеи-А и Краба в 2015-2018 гг. в диапазоне 6.2 см, в поляризационных каналах 1, окно слева, и 2, окно справа.

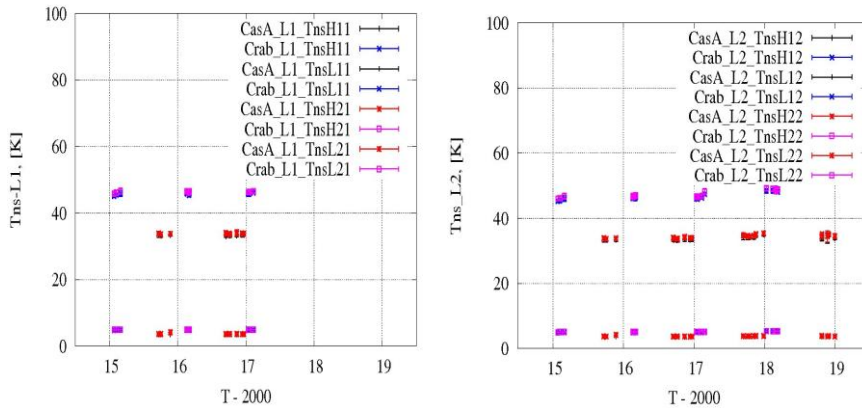


Рис. 2. То же, что на Рис.1, но в диапазоне 18 см.

Для обратного перехода --- от антенных температур, приведенных на рисунках и в таблицах, к эффективной спектральной плотности потока в Янских --- достаточно умножить эти значения усиления антенны на соответствующие значения антенных температур.

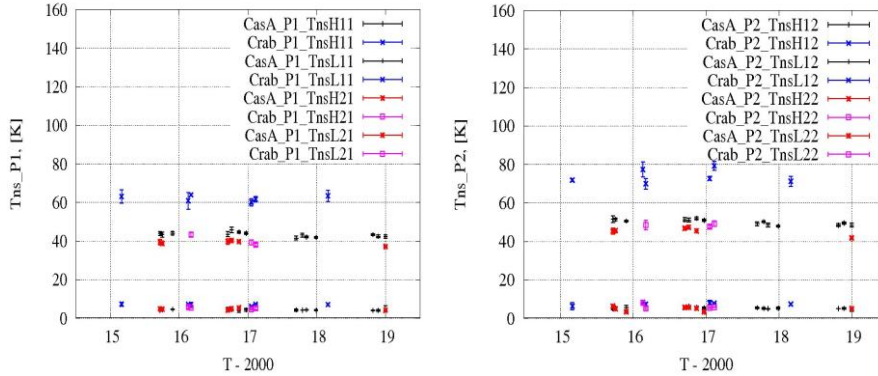


Рис. 3. То же, что на Рис. 1, но в диапазоне 92 см.

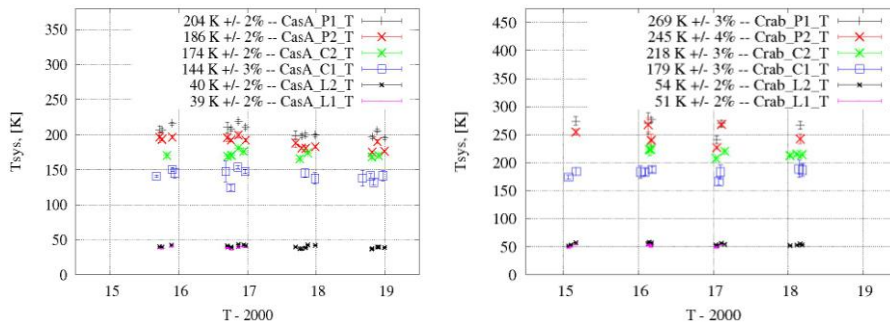


Рис. 4. Эквивалентная шумовая температура системы КРТ в диапазонах 6.2 (С), 18 (L) и 92 (P) см, в каналах 1 и 2 (левой и правой круговых поляризациях), измеренная относительно первичных астрономических калибраторов по потоку Кассиопеи-А (окно слева) и Крабовидной туманности (окно справа) в 2015 -- 2018 годах. Шумы Галактики не исключены

Обсуждение

На Рис. 1-3 для каждого канала С1, С2, L1, L2, P1, P2 в диапазонах 6.2 (С), 18 (L) и 92 (P) см (в поляризационных каналах 1 и 2), соответственно, даны значения всех ГШ и шумов системы в антенных температурах (в Кельвинах). В таблице 1 приведены их усредненные значения. При этом в указанные погрешности в этой таблице не включены погрешности шкалы потоков, которые согласно [4, 5] примерно равны 5-10 процентам (по Кассиопее-А), в зависимости от диапазона. Аналогично на Рис. 4 приведены результаты мониторинга собственных шумов системы КРТ (в которые включены также шумы от Галактики у калибраторов и фона неба).

Следует подчеркнуть, что измеренными для калибровок по потоку являются значения величин в спектральных плотностях потока излучения, в единицах Янских (т.е. SEFD для шумов системы). Именно они нужны для астрономической калибровки КРТ в юстировочных сеансах и сеансах РСДБ (подробнее см., например, раздел 5.1 в [1]). Их полная погрешность измерения определяется погрешностями измерений и первичной калибровочной шкалы по Кассопее-А -- около 10% [4, 5], в отличие от погрешности для шкалы антенных температур--- около (13-15) %, как и в [1,2].

Анализ Рис. 1-3 и Табл. 1 показывает, что с погрешностью измерений в несколько процентов все исследованные калибровочные ГШ были стабильны в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в течение четырех лет с 2015 по 2018 гг. Из Рис. 4 следует, что в это же время с погрешностью в несколько процентов были стабильны и собственные шумы системы КРТ в этих диапазонах. Сравнение собственных шумов системы КРТ, измеренных относительно первичного калибратора Кассиопеи-А, в 2015-2018 гг на Рис. 4 (окно слева) и в первые годы измерений в 2011-2013 гг (Табл. 1, п. 1.1 в [2]) показывает, что они практически совпадают --- в пределах 11% в диапазонах 6.2 и 92 см, и в пределах 17% в диапазоне 18 см.

Отсутствие измерений в канале 1 диапазона 18 см (Рис. 2, левое окно) связано с выходом из строя этого канала с марта 2017 года. Предполагаемая причина -- влияние космических лучей на электрические параметры блока малошумящих усилителей (МШУ), вынесенных в открытый космос из фокального контейнера (о размещении приборов КРТ см. подробнее в [1]). Этот эффект известен по аналогичным событиям при полетах спутников Земли (см. информацию в интернете). Данное предположение подтверждается также тем, что в дальнейшем было зафиксировано самопроизвольное временное восстановление прежней работоспособности этого канала в нескольких юстировочных сеансах в течение года.

Вместе с тем, на всех рисунках и таблицах обращают на себя внимание систематические отличия полученных калибровочных значений ГШ и собственных шумов системы, измеренных по Кассиопее-А от значений по Крабовидной туманности -- см. средние значения для этих источников и их отношения в Табл. 1-3.

Таблица 1

Средняя антенная температура восьми ГШ, калиброванная в градусах К по Кассиопее-А и Крабу и погрешность в процентах в диапазонах 6.2, 18 и 92 см за 2015-2018 гг

| | <i>Cas-A</i> 6.2 см | <i>Crab</i> 6.2 см | <i>Cas-A</i> 18 см | <i>Crab</i> 18 см | <i>Cas-A</i> 92 см | <i>Crab</i> 92 см |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| тип ГШ | $T_{\text{ГШ}}, \text{K} / \%$ | $T_{\text{ГШ}}, \text{K} / \%$ | $T_{\text{ГШ}}, \text{K} / \%$ | $T_{\text{ГШ}}, \text{K} / \%$ | $T_{\text{ГШ}}, \text{K} / \%$ | $T_{\text{ГШ}}, \text{K} / \%$ |
| H11 | 156 / 2 | 196 / 2 | 33.3 / 1 | 45.7 / 1 | 42.9 / 1 | 63.2 / 1 |
| L11 | 7.04 / 1 | 8.83 / 2 | 3.54 / 1 | 4.87 / 1 | 4.28 / 1 | 6.65 / 4 |
| H21 | 126 / 2 | 158 / 2 | 33.8 / 1 | 46.3 / 1 | 38.8 / 2 | 40.1 / 4 |
| L21 | 9.31 / 1 | 11.6 / 2 | 3.62 / 1 | 4.96 / 1 | 4.69 / 4 | 5.40 / 3 |
| H12 | 298 / 4 | 398 / 2 | 33.7 / 1 | 46.6 / 1 | 49.9 / 1 | 72.5 / 1 |
| L12 | 11.0 / 3 | 14.4 / 1 | 3.67 / 1 | 5.09 / 1 | 5.34 / 2 | 7.76 / 1 |
| H22 | 257 / 4 | 346 / 2 | 34.3 / 1 | 47.2 / 1 | 45.3 / 2 | 48.0 / 1 |
| L22 | 16.6 / 3 | 22.2 / 1 | 3.74 / 1 | 5.16 / 1 | 5.22 / 2 | 5.75 / 3 |

Таблица 2

Отношение антенных температур ГШ, измеренных по Крабовидной туманности к тем же величинам, измеренным по Кассиопее-А, --- по данным Табл. 1

| | <i>Crab/Cas-A</i> 6.2 см | <i>Crab./CasA</i> 18 см | <i>Crab/Cas-A</i> 92 см |
|--------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| код ГШ | $T_{\text{ГШ}}/T_{\text{ГШ}}$ | $T_{\text{ГШ}}/T_{\text{ГШ}}$ | $T_{\text{ГШ}}/T_{\text{ГШ}}$ |
| H11 | 1.26 | 1.37 | 1.47 |
| L11 | 1.25 | 1.38 | 1.55 |
| H21 | 1.25 | 1.37 | 1.03 |
| L21 | 1.25 | 1.37 | 1.15 |
| H12 | 1.34 | 1.38 | 1.45 |
| L12 | 1.31 | 1.38 | 1.45 |
| H22 | 1.35 | 1.38 | 1.06 |
| L22 | 1.40 | 1.38 | 1.10 |

Так, из Табл. 2 следует, что калибровка ГШ по Крабовидной туманности оказывается систематически выше, чем по Кассиопее-А: примерно на 25% для четырех ГШ в канале 1 и на 35% для других четырех ГШ в канале 2 диапазона 6.2 см; на 38% в диапазоне 18 см; и от 3% до 55% в диапазоне 92 см. Близкая картина и по шумам системы КРТ в Табл. 3: шумы, измеренные по Крабовидной туманности, выше примерно на 25% в диапазоне 6.2 см и на 33% в диапазонах 18 и 92 см. Причина может быть связана как с разным вкладом фона Галактики вблизи этих калибраторов, так и с погрешностями шкал спектральной плотности потока -- используемой прежней [4] и предложенной новой [5]. Несмотря на то, что эти отличия в некоторых случаях могли бы рассматриваться как допустимые в РСДБ, если брать средние значения, следует рекомендовать по-прежнему использовать калибровки, выполненные относительно Кассиопеи-А в шкале плотности потока [4] для корректного сравнения с результатами первых лет работы в [1-3].

Таблица 3

Отношение шумов системы КРТ в двух поляризационных каналах каждого из трех диапазонов 6.2 (C1 и C2), 18 (L1 и L2) и 92 (P1 и P2) см, измеренных по Крабовидной туманности к тем же величинам, измеренным по Кассиопее-А, --- по данным Рис. 4

| код канала | <i>C1</i> 6.2 см | <i>C2</i> 6.2 см | <i>L1</i> 18 см | <i>L2</i> 18 см | <i>P1</i> 92 см | <i>P2</i> 92 см |
|------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Tsys/Tsys | 1.24 | 1.25 | 1.31 | 1.35 | 1.32 | 1.32 |

Заключение

Суммируем основные полученные результаты.

1. Относительно первичных астрономических калибраторов по потоку Кассиопеи-А и Крабовидная туманность выполнена калибровка эквивалентных собственных шумов системы космического телескопа и большого количества внутренних калибро-

вочных генераторов шумового сигнала в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в каналах левой и правой круговых поляризации. Каждая из этих величин независимо может использоваться для дальнейшей проверки или калибровки КРТ в режимах работы одиночного телескопа или элемента наземно-космического РСДБ в 2015--2018 гг.

2. Показано, что собственные шумы системы телескопа, измеренные в 2015-2018 гг и откалиброванные относительно Кассиопеи-А, близки по величине к шумам, измеренным в первые годы работы КРТ [1-2] --- в пределах 11% в диапазонах 6.2 и 18 см и в пределах 17% в диапазоне 92 см.

3. Выполнено сравнение всех калибровок, проведенных относительно Кассиопеи-А с калибровками по Крабовидной туманности. Обнаружено систематическое отличие одних и тех же калиброванных величин по этим объектам, в зависимости от диапазона. Требуется дальнейший анализ причин этих отличий. На данном этапе источник Кассиопея-А предпочтительнее по-прежнему использовать как первичный астрономический калибратор по потоку в шкале [4] для всех калибровок КРТ.

Литература

1. *Kardashev N. S., Khartov V. V., Abramov V. V. et al.* "RadioAstron" -- A Telescope with a Size of 3000 000 km: Main Parameters and First Observational Results // *Astron Rep.* — 2013. — Vol. 57, № 3. — P. 153–194.

2. *Kovalev Yu. A., Vasil'kov V. I., Popov M. V. et al.* The RadioAstron Project: Measurements and Analysis of Basic Parameters of Space Telescope in Flight in 2011-2013 // *Cosm. Res.* --- 2014 --- Vol. 52, Issue 5, — P 393-402.

3. Astro Space Center P.N. Lebedev Physical Institute of RAS [Electronic address]. --- URL: <http://asc-lebedev.ru>.

4. *Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A.* The absolute spectrum of Cas A; An accurate flux density scale and a set of secondary calibrators // *Astron Astrophys.* --- 1977 --- V. 61 --- P. . 99--106.

5. *Perley R. A., Butler B. J.* An Accurate Flux Density Scale from 50 MHz to 50 GHz // *Astrophys. J. Suppl.* — 2017. — Vol. 230, no 7. — 18 pp.

"RadioAstron" Project. Calibration of the Space Radio Telescope in Flight at wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in 2015--2018

© Yu. A. Kovalev, V. I. Vasil'kov, A. N. Ermakov, E. N. Vinyajkin,
M V. Popov, V. A. Soglasnov, M. G. Larionov, N. Ya. Nikolaev, M. S. Burgin,
Y. Y. Kovalev, P. A. Voitsik, M. M. Lisakov, A. M. Kutkin, A. V. Alakoz,
N. N. Shakhvorostova, K. G. Belousov, A. V. Kovalenko

Goals and objectives. Using a new automated system, process all observations of primary astronomical flux density calibrators, -- Cassiopea-A and Crab Nebula, -- performed at the wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in the left and right circular polarizations with the space radio telescope (SRT) in 2015 - 2018 in the calibration sets. The goals: 1) to calibrate the SRT's System Equivalent Flux Density, SEFD, and internal calibration noise sources (NS, in Jy), 2) to investigate their time stability.

Methods. The used automated system for data reduction converts the initial binary telemetry data from the radiometric outputs of interferometric receivers into a calibrated result for the SRT noise and NS-amplitudes for each polarization channel. The results are calibrated in units of spectral flux density (in Jy) and antenna temperature (in Kelvin) to the time of observation. They are weighted averaged in the time and compared with each other and with the earlier SEFD for the SRT in flight.

Conclusions. 1. The SEFD and the internal calibration noise signal sources for the SRT were calibrated at the wavelengths of 6.2, 18 and 92 cm in left and right circular polarization relative to Cassiopea-A and Crab Nebula. They can be independently used for further verification or calibration of the SRT in the operating modes as for a single telescope as for a space element of the ground-space VLBI in 2015 -- 2018.

2. It is shown that the SEFD, measured in 2015-2018 and calibrated relative to Cassiopeia-A, is close to the SEFD in the first years of SRT operation -- within 11% for 6.2 and 18 cm and within 17% for 92 cm wavelengths.

3. The systematic differences between the calibrated values relative to Cassiopeia-A and to Crab Nebula were found in dependence on wavelengths. Further analysis of the reasons for these differences is required.

Keywords: RadioAstron, Space Telescope, Main Antenna Parameters, SRT Calibration, VLBI, telemetry, Data Auto Reduction.