

УДК 520.844

А. Е. Вольвач¹, В. И. Костенко², М. Г. Ларионов², Л. Н. Вольвач¹

¹ Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», с. Наукове, Крим

² Астрокосмічний центр Установи Російської академії наук Фізичного інституту ім. П. Н. Лебедева, Москва, Росія

ТЕСТИРОВАНИЕ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА МИССИИ «РАДИОАСТРОН». ИНТЕРФЕРОМЕТР СИМЕИЗ — ПУЩИНО НА ДЛИНАХ ВОЛН 6 см И 1.35 см

У рамках програми кооперації між науковими організаціями України і Росії проведено цикл досліджень з підготовки функціонування наземного сегменту місії «РадиоАстрон». Для рішення задачі на 22-м радіотелескопі міліметрового діапазону РТ-22 (НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія») була підготовлена наукова програма вимірів, істотною частиною якої було дослідження компактних утворень у структурі позагалактичних джерел, а також структурі і просторовому розподілі галактичних мазерів у лінії водяної пари H_2O . Для тестування моделі наземного сегменту «РадиоАстрон» на РТ-22 КрАО в Симеїзі і РТ-22 ПРАО в Пущино спільно виконані наземні РНДБ-експерименти. У результаті обробки даних, записаних на кожній з антен, на кореляторі АКЦ ФІАН отримано і прокалібровано амплітуди і фази кроскореляційних функцій, а також зроблено оцінку доступного часу когерентності. Результати експерименту демонструють готовність РТ-22 (КрАО) до участі у подальших спільних радіоінтерферометричних сеансах, у тому числі і до робіт з проекту «РадиоАстрон». Проведена модернізація апаратури на станції Симеїз дала можливість розпочати проведення систематичних і комплексних поляризаційних досліджень областей зіркоутворення.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе реализации наземно-космической программы «РадиоАстрон» предполагается получить экспериментальный материал для решения важнейших астрофизических задач по изучению строения и эволюции объектов Вселенной, выяснению механизма энерговыделения в источниках на всех уровнях иерархии объектов. Чрезвычайная важность задач, которые предстоит рассмотреть в будущем, определяет и масштабы экспериментов по картографированию скрытых от наблюдателя областей компактных ядер активных галактик.

В рамках подготовки научной программы «РадиоАстрон» был составлен предварительный каталог радиоисточников, по прогнозам имеющих избытки плотности потока на высоких частотах [1, 3]. Для количественной оценки неполноты

полученного списка радиоисточников строилась экстраполированная зависимость подсчетов числа источников ($\lg N - \lg S$) на частоте 22 ГГц [4].

Для исследования оптических свойств радиоисточников каталога «РадиоАстрон» по сравнению с объектами, представляющими собой полные выборки источников в радиодиапазоне, выполнялся сравнительный анализ оптических и радиохарактеристик объектов в каталоге.

В список указанного каталога были отображены объекты с инвертированными спектрами и потоками более 250 мЯн. В среднем выборка объектов каталога «РадиоАстрон» содержит более мощные источники по сравнению с полной выборкой на частоте 87 ГВ. Полученные результаты об изменчивости свойств источников в каталоге «РадиоАстрон» указывают, что наряду с работой «центральной машины», активные процессы звездообразования в ядрах космологически удаленных источников поставляют значи-

© А. Е. ВОЛЬВАЧ, В. И. КОСТЕНКО, М. Г. ЛАРИОНОВ,
Л. Н. ВОЛЬВАЧ, 2011

тельную пылевую составляющую. За счет этого может трансформироваться и цвет источников. Одновременное наличие вспышек звездообразования и активности в ядрах может служить косвенным указанием на космологическую удаленность объектов, так как увеличение скорости звездообразования напрямую связано с увеличением красного смещения источников.

Проведено сравнение спектральных характеристик и параметров переменности потоков излучения источников каталога WMAP и объектами результирующего каталога «РадиоАстрон». Для этой цели с использованием радиотелескопа РТ-22 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» на частотах 22.2 и 36.8 ГГц получены наблюдательные данные полной выборки радиоисточников каталога WMAP для положительных склонений [2].

ТЕСТОВЫЕ НАЗЕМНЫЕ РСДБ-СЕАНСЫ

В целях дальнейшего обоснования, экспериментального расширения и подтверждения указанных выводов в рамках выполнения предстоящей миссии «РадиоАстрон» был проведен ряд подготовительных работ на модели наземного сегмента проекта. В частности, на полигоне в Пушино были проведены комплексные испытания бортового радиотелескопа КРТ-10, в процессе которых были получены основные его характеристики, удовлетворяющие проектным требованиям. В НПО им. С. А. Лавочкина было выполнено тестирование раскрытия элементов поверхности главного зеркала телескопа и испытание всех систем бортового аппаратурного комплекса.

В плане отработки наземно-космической миссии «РадиоАстрон» в 2009 и 2010 гг. были подготовлены и проведены наземные РСДБ-эксперименты в различных частотных и спектральных модах проекта, а именно, использова-

лись верхние и нижние боковые полосы приема в двух круговых поляризациях – правой и левой. Наблюдения проводились на двух близких по характеристикам радиотелескопах РТ-22 в Пушино (Россия) и в Симеизе (Украина). Параметры РТ-22 в Пушино были подобраны таким образом, чтобы оказалось возможным имитировать наземный интерферометр с элементами РТ-22 (Симеиз) и космический радиотелескоп. Для этого была искусственно снижена эффективная площадь РТ-22 (Пушино) и ухудшены шумовые параметры приемной аппаратуры.

Предварительно была проведена модернизация аппаратуры и отработаны современные методы наблюдений необходимые для работы РТ-22 НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» в глобальной РСДБ-сети. Радиотелескоп оснащен аппаратурой, необходимой для РСДБ-исследований космических объектов в миллиметровой области спектра: специализированными высокоскоростными устройствами регистрации данных «Марк-5А», «Марк-5В+», терминалом регистрации в режиме квазиреального времени, водородным стандартом частоты и времени со стабильностью 10^{-15} . Эти нововведения дали возможность продолжить исследования сверхтонкой структуры источников космического радиоизлучения в диапазоне от миллиметровых до дециметровых длин волн, проводить наблюдения астероидов, планет земной группы и мониторинг космического мусора с помощью объединения методов РСДБ и классической радиолокации.

РТ-22 в Пушино также оснащен приемной аппаратурой на длины волн 6 и 1.35 см, цифровыми видеоконверторами, российской системой регистрации РДР-1, водородным стандартом частоты и времени.

Эксперимент на длине волны 6 см. Первый РСДБ-сеанс наблюдений был выполнен в ок-

Таблица 1. Параметры системы радиотелескоп-радиометр для станций Симеиз и Пушино

Антенна	Система регистрации	$A_{эф}$, м ²	T_{sys} , К	SEFD, Ян
Пушино	RDR-1	100	170	4680
Симеиз	Марк-5А	230	120	1440
Космический телескоп	RDR-1	40	70	4800

тябре 2009 г. на длине волны 6 см. Регистрация данных производилась в полосах 4 МГц, в Симеизе — на дисковые регистраторы системы «Марк-5А», а в Пушино — на регистраторе АКЦ РДР-1 (формат RDF). Синхронизация систем в двух пунктах обеспечивалась водородными стандартами частоты и времени и системой синхронизации времени GPS. Для наблюдений были выбраны два источника 3С 454.3 и S 0528+134 (Nimfa). Первый — более сильный источник использовался для уточнения фазовых движений и офсетных параметров в каждом пункте наблюдений. Второй — более слабый объект использовался для отработки времени когерентного усреднения. Параметры радиотелескопов приведены в табл. 1.

В повторном РСДБ-сеансе на длине волны 6 см, который был проведен в июле 2010 г. с модернизированной аппаратурой на РТ-22 в Пушино, проводилась оценка времени когерентного накопления по проектному заданию программы «РадиоАстрон». Наблюдались источники 3С 273 и 1055+018. На последнем, более слабом источнике проводилась отработка максимального 300 с времени когерентного усреднения данных интерферометрических наблюдений.

На рис. 1 приведен отклик для радиоисточника 1055+018 на базе Симеиз — Пушино с временем когерентного интегрирования 400 с.

Во время проведения данного РСДБ-сеанса на радиотелескопе в Пушино имитировалась чувствительность космической антенны в проекте «РадиоАстрон». Интервал когерентности интерферометра Симеиз — Пушино на длине волны 6 см составил при этом около 700 с (рис. 2).

Эксперимент на длине волны 1.35 см. Минимальная длина волны наблюдений, планируемая в проекте «РадиоАстрон» — 1.35 см. Для провер-

Таблица 2. Параметры РТ-22 в Симеизе и Пушино на длине волны 1.35 см

Параметр	Симеиз ($D = 22$ м)	Пушино ($D = 22$ м)
$A_{эф}$, м ²	230	90
КИП, %	50	20
$T_{sys}(\tau = 0)$, К	130 (с атмосферой)	260 (с атмосферой)

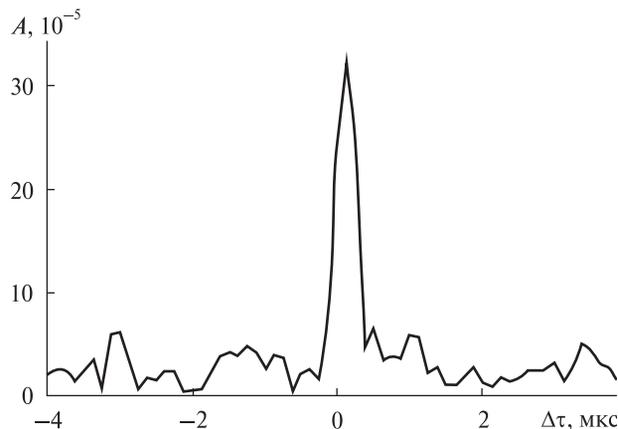


Рис. 1. Отклик для радиоисточника 1055+018 на базе Симеиз — Пушино с временем когерентного интегрирования 400 с. Соотношение сигнал/шум около 15. Коррелированная плотность потока — около 100 мЯн

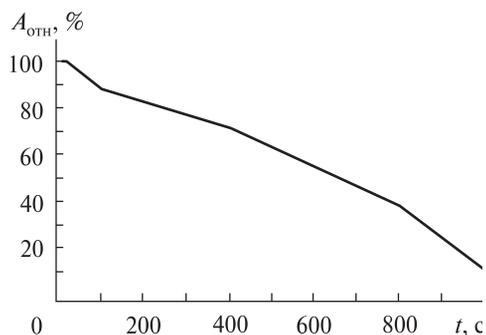


Рис. 2. Кривая автокорреляции для базы Симеиз — Пушино (время когерентности интерферометра около 700 с)

ки параметров модели наземного сегмента в этом диапазоне волн в марте 2010 г. был проведен сеанс радиоинтерферометрии между указанными радиотелескопами в непрерывном спектре и в линии H₂O вблизи частоты 22.235 ГГц.

Параметры станций приведены в табл. 2. Температура системы T_{sys} приведена с учетом вклада температуры атмосферы Земли в направлении зенита (ζ).

Зависимость T_{sys} от угла места для станций Симеиз и Пушино приведена на рис. 3.

Автоспектры On-Off для источника Orion KL в Симеизе и Пушино (синий цвет) для дня года 085 времени наблюдения 13:00 UTC, $dF = 3.9$ кГц, времени накопления 1 мин приведены на рис. 4.

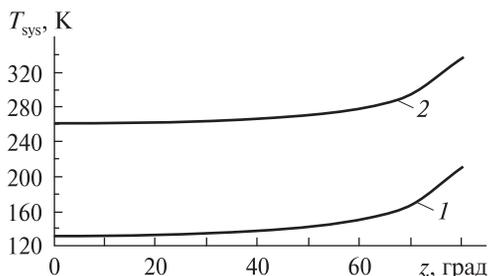


Рис. 3. Зависимость температуры системы от угла места для станций Симеиз (1) и Пушино (2)

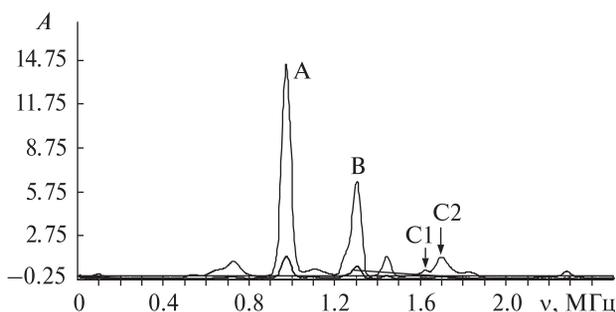


Рис. 4. Автоспектры в Симеизе и Пушино для источника Orion KL

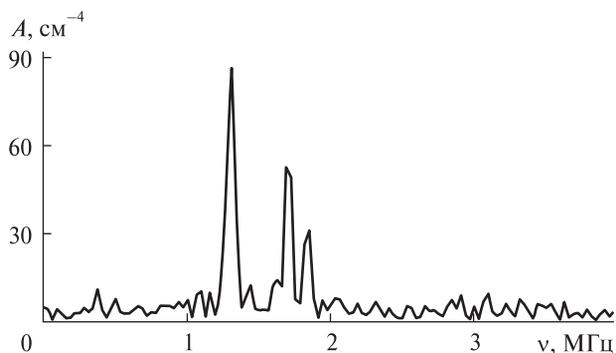


Рис. 5. Orion KL, скан 0851315, амплитуда $A = 0.025$ на частоте 1.3 МГц, Cross LL CP, векторное усреднение, время накопления 1 мин

Лучевые скорости и частоты компонентов составили соответственно:

- Компонент А $\nu = +12.2$ км/с (0.97 МГц)
- Компонент В $\nu = +7.7$ км/с (1.30 МГц)
- Компоненты C1, C2 $\nu = +2.5, 0.5$ км/с (1.7, 1.85 МГц)

На рис. 5 приведен скан источника Orion KL для дня года 085 времени наблюдений 13:15 UTC, с учетом потерь при обработке и поглощения в атмосфере. Как видно из рис. 5, зарегистрированы коррелированные отклики от компонентов

C1, C2 ($Ampl = 0.018, 0.009$) на частотах около 1.7 и 1.85 МГц.

В табл. 3 приведены данные коррелированной амплитуды для компонентов А и В, исправленной за поглощение в атмосфере и 1-битное квантование за три дня наблюдений.

В табл. 4 приведены антенная температура, коррелированный поток и функция видности для спектральных компонентов А, В, C1 и C2 источника Orion KL.

Малые значения функции видности свидетельствуют о том, что размеры рассмотренных спектральных компонентов в спектре радиоизлучения H_2O в источнике Orion KL превышают 20 мсд (миллисекунд дуги).

СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИСТОЧНИКА ORION KL В ЛИНИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВОЛНЕ 1.35 см НА СТАНЦИИ СИМЕИЗ

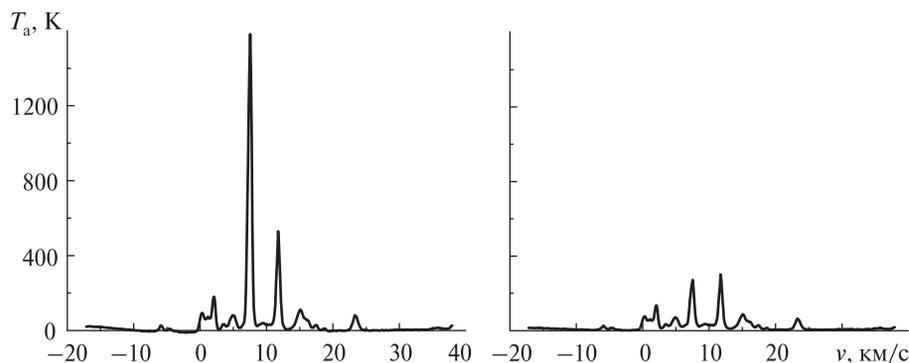
После окончания сеансов РСДБ наблюдений на базе Симеиз — Пушино были проведены спектрально-поляризационные наблюдения источника Orion KL в одиночном режиме на станции Симеиз на длине волны 1.35 см с помощью разработанного и введенного в действие приемника с частотным разрешением 0.5 кГц на базе фурье-спектр-анализатора параллельного типа. Особенностью данного приемного устройства является наличие поляризатора, работающего на эффекте Фарадея. Управление поляризатором производится в автоматическом режиме.

Измерения параметров системы радиотелескоп-радиометр проводились с помощью системы регистрации «Марк-5В+» и программного обеспечения, созданного в лаборатории радиоастрономии КрАО. Шумовая температура сис-

Таблица 3. Orion KL, среднее значение амплитуды для компонентов А и В по дням наблюдений

День наблюдений	Коррелированная амплитуда (исправлено за атмосферу и 1-бит квантование)		dRate (B-A), Гц
	А	В	
83	0.0410	0.0129	0.232
84	0.0380	0.0154	0.243
85	0.0420	0.0146	0.254
Среднее	0.040	0.014	0.243

Рис. 6. Спектр источника Orion KL при настройке поляризатора на максимум (слева) и минимум (справа) поляризованного сигнала в линии около 8 км/с (спектральная составная В)



темы определялась по источникам с известными в данном диапазоне потоками: DR 21, Vir-A, Cyg-A, Tau-A.

На рис. 6 приведены измеренные спектры источников при настройке поляризатора на максимум и минимум поляризованного сигнала. По горизонтальной оси отложена скорость в км/с, по вертикальной — антенная температура в кельвинах. Как видно из рис. 6, в данный момент спектр источника состоит из семи основных компонентов. Излучение компонента с лучевой скоростью 7.7 км/с обнаруживает наличие степени линейной поляризации около 70 % с позиционным углом плоскости поляризации около -20° . Спектральные компоненты А (12.2 км/с), С1 (2.5 км/с) и С2 (0.5 км/с) не обнаруживают линейной поляризации.

В первую эпоху активности источника в 1979—1987 гг. степень поляризации излучения источников составляла 60—70 %, а позиционный угол плоскости поляризации изменялся от -15 для высокоскоростных деталей до -40 у низкоскоростных, но был практически постоянным во времени для каждой отдельно взятой детали [6]. В ноябре 1991 г. источник находился в со-

стоянии низкой активности. Степень линейной поляризации в максимуме линии с лучевой скоростью 7.2 км/с уменьшилась до 43 %. Позиционный угол плоскости поляризации был равен -28° [5].

По данным проведенных в близкую эпоху РСДБ-наблюдений на базе Симеиз — Пушино в газопылевом комплексе Orion KL выделен ряд активных зон. Размеры спектральных компонентов в спектре радиоизлучения H_2O в Orion KL превышают 20 мсд.

ВЫВОДЫ

В экспериментах на волнах 6 и 1.35 см получены и прокалиброваны амплитуды и фазы кросскорреляционных функций и их ход со временем. Продемонстрирована достижимость расчетных параметров аппаратных средств радиотелескопа РТ-22 (Симеиз) и его готовность к участию в дальнейших интерферометрических сеансах. После модернизации РТ-70 (Евпатория) РСДБ-наблюдения по программе «РадиоАстрон» с более высокой чувствительностью будут продолжены с участием трех антенн.

В результате проведенных экспериментов по тестированию наземной сети проекта «РадиоАстрон» можно сделать следующие выводы:

- 1) параметры чувствительности и когерентные свойства интерферометров, реализованных на длинах волн 6 и 1.35 см, соответствуют расчетным для данных показателей отдельных антенн;
- 2) эксперимент с эмуляцией параметров бортового радиоастрономического комплекса свидетельствует о возможности выделения на интерферометре Симеиз-КРТ10 сигналов с коррели-

Таблица 4. Orion KL, характеристики компонентов А, В, С1 и С2

Спектральный компонент	T_a , коррелированная в полосе 16 кГц, К	Коррелированный поток, Ян	Функция видности
	19.3	370	0.015
В	17.4	330	0.025
С1	8.7	170	0.060
С2	4.4	80	0.060

рованным потоком около 100 мЯн при времени когерентного интегрирования около 10 с при соотношении сигнал/шум около 10 и полосе сигнала 6 МГц;

3) РСДБ-эксперимент на длине волны 1.35 см между станциями Симеиз и Пушино продемонстрировал возможности дальнейшего использования указанного интерферометра для спектральных наблюдений в линии водяного пара;

4) введение в действие спектрально-поляриметрического фурье-анализатора на станции Симеиз позволило проводить систематические и комплексные поляризационные исследования областей звездообразования.

Авторы признательны С. Ф. Лихачеву за поддержку в наблюдениях и обработке данных на программном процессоре АКЦ ФИАН, А. В. Коваленко и Б. З. Каневскому за техническую и организационную поддержку экспериментов на антенне в Пушино, И. Д. Стрелке за техническую и организационную поддержку экспериментов на антенне в Симеизе.

1. Вольвач А. Е. Каталог источников для полетной программы «РадиоАстрон» // Космическая наука и технология. — 2009. — **15**, № 6. — С. 28—43.
2. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. Исследование источников каталога WMAP // Астрон. журн. — 2008. — **85**, № 6. — С. 483—497.
3. Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. Об исследовании компактных радиоисточников для программы «РадиоАстрон» // Тр. Гос. астрон. ин-та им. П. К. Штернберга. — 2004. — **75**. — С. 184—185.
4. Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. и др. Исследование статистических и спектральных характе-

ристик радиоисточников каталога «Радиоастрон» в мм диапазоне длин волн // Кинематика и физика небес. тел. — 2007. — **23**, № 3. — С. 174—185.

5. Вольвач А. Е., Матвеев Л. И., Нестеров Н. С. Спектрально-поляриметрические наблюдения линии H₂O (1.35 см) в Орионе KL // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 1995. — **89**. — С. 108—110.
6. Матвеев Л. И., Грэм Д., Даймонд Ф. Область вспышка излучения H₂O мазера в Орионе KL // Письма в Астрон. журн. — 1988. — **14**. — С. 1101—1122.

Надійшла до редакції 27.10.10

A. E. Volvach, V. I. Kostenko, M. G. Larionov, L. N. Volvach

THE TEST OF THE GROUND-BASED SEGMENT OF THE RADIOASTRON MISSION. THE SIMEIZ — PUSHCHINO INTERFEROMETER AT WAVELENGTHS OF 6 AND 1.35 CM

In accordance with the scientific cooperation between Ukraine and Russia, a series of studies is carried out for the preparation of the operation of the ground segment of the «RadioAstron» mission. We elaborated a scientific program of measurements with the use of the 22-m radio telescope RT-22 of the Crimean Astrophysical Observatory. A substantial part of the program is the investigation of compact structures in extragalactic sources as well as the study of structures and the spatial distribution of H₂O galactic masers. To test the model of the ground segment of the «RadioAstron» mission, ground-based VLBI test experiments are conducted jointly with RT-22 of the Crimean Astrophysical Observatory in Simeiz and RT-22 of the PRAO in Pushchino. As a result of data processing with the use of the ASC LPI correlator, amplitudes and phases of cross-correlation functions are obtained and calibrated as well as the available coherence time is estimated. The results of the experiment show that RT-22 of the Crimean Astrophysical Observatory can be used for further joint radiointerferometric sessions, including investigations on the «RadioAstron» project. The modernization of the Simeiz station allowed one to begin systematic and combined polarization researches of star formation regions.