

УДК 520.274

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАЗЕМНЫХ РСДБ СТАНЦИЙ ЕВПАТОРИЯ–СИМЕИЗ–ПУЩИНО В ПРОЕКТЕ “РАДИОАСТРОН”

© 2015 г. А. Е. Вольвач¹, В. И. Костенко², М. Г. Ларионов², Л. Н. Вольвач¹, Д. М. Муха³,
А. С. Набатов³, А. М. Резниченко³, Б. З. Каневский², А. В. Коваленко²

¹Лаборатория радиоастрономии НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”

²Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

³Радиоастрономический институт НАН Украины, г. Харьков

mgl@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.12.2013 г.

В статье приводятся результаты наземных РСДБ экспериментов, выполненных на частотах проекта “РадиоАстрон”, между РСДБ пунктами Симеиз (РТ-22)–Евпатория (РТ-70) и Симеиз (РТ-22)–Пушино (РТ-22).

DOI: 10.7868/S0023420615030073

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2009, 2010 гг. в рамках миссии “РадиоАстрон” были организованы и проведены наземные РСДБ эксперименты в различных частотных и спектральных модах проекта, а именно, в верхней и нижней боковых полосах приема и в двух круговых поляризациях – правой и левой на длинах волн 1.35 и 6 см с использованием интерферометрических пунктов Пушино и Симеиз.

В сентябре 2011 г. совместно АКЦ ФИАН (Москва), НИИ “КрАО” (Симеиз), РИ НАНУ (г. Харьков) и НЦУИКС (Евпатория) провели наземные РСДБ эксперименты с использованием антенн РТ-22 в Симеизе и РТ-70 в Евпатории на длинах волн 6 и 18 см. Интерферометрический пункт в Симеизе ранее был оснащен необходимой аппаратурой и неоднократно участвовал в радиоинтерферометрических экспериментах в составе глобальной сети РСДБ и европейской сети EVN. Он мог быть использован как опорный пункт на базе Симеиз–Евпатория. Длина базы Симеиз–Евпатория составляет около 110 км. Максимальное угловое разрешение на волнах 18 и 6 см в направлении С–Ю равно 0.33 и 0.18 с дуги и в направлении В–З – 1.2 и 0.7 с. Длина базы Пушино–Симеиз равнялась 1100 км и максимальное разрешение в направлении С–Ю на длине волны 1.35 см было около одной миллисекунды дуги.

2. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНЫХ РСДБ ТЕСТОВ

Параметры радиотелескопа РТ-22 в Пушино (эффективная площадь, шумы приемной аппаратуры) были хуже, чем в Симеизе, так что по эффективности он мог имитировать бортовой радиотелескоп аппарата *Спектр-Р*. На РТ-22 в Пушино была

установлена приемная аппаратура, цифровые видеоконвертеры и система регистрации РДР-1, водородный стандарт частоты и времени.

На РТ-22 (Симеиз) была проведена модернизация аппаратуры и отработаны современные методы наблюдений необходимые для работы в глобальной РСДБ сети. Радиотелескоп РТ-22 оснащен аппаратурой, необходимой для РСДБ исследований космических объектов в сантиметровом и миллиметровом областях спектра с использованием специализированных высокоскоростных цифровых устройств регистрации данных Марк-5А, Марк-5В+.

РТ-70 в Евпатории имел в составе высокочувствительный приемный комплекс аппаратуры на длины волн 6 см и 18 см, цифровые видеоконвертеры и систему регистрации РДР-1. Кроме того, пункты РСДБ в Симеизе и Евпатории были оснащены высокостабильными водородными стандартами частоты с относительной стабильностью частоты 10^{-14} и привязки местных шкал времени к шкале GPS с погрешностью не хуже 10^{-8} с.

3. ИНТЕРФЕРОМЕТР СИМЕИЗ–ПУЩИНО

3.1. Эксперимент на длине волны 6 см. Первый РСДБ сеанс наблюдений был выполнен в октябре 2009 г. на длине волны 6 см. Регистрация данных производилась в полосе 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. Для наблюдений были выбраны два источника 3С 454.3 и S 0528 + 134 (Nimfa). Первый – более

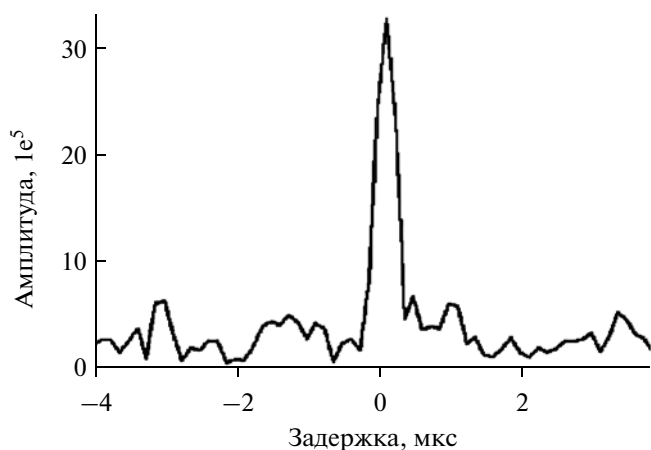


Рис. 1. Интерферометр Симеиз–Пушино – реализация времени когерентного накопления. Соотношение сигнал/шум около 30. Коррелированная плотность потока около 100 мЯн.

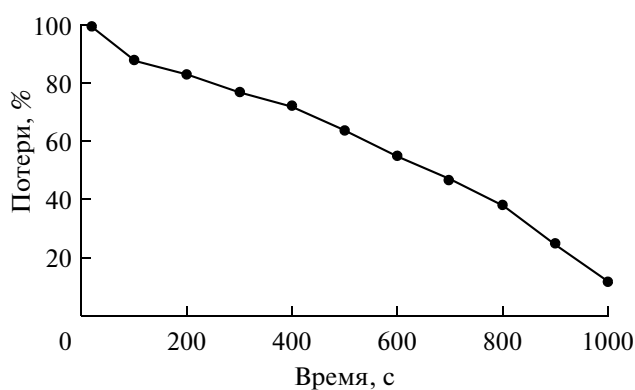


Рис. 2. Потери интегрирования на базе Симеиз–Пушино на волне 6 см.

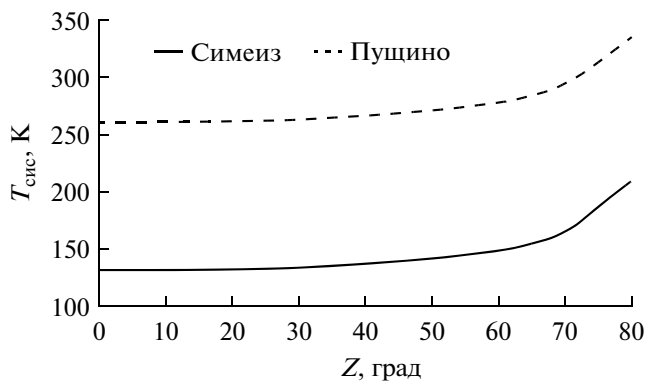


Рис. 3. Зависимость температуры системы от угла места для станций Симеиз и Пушино.

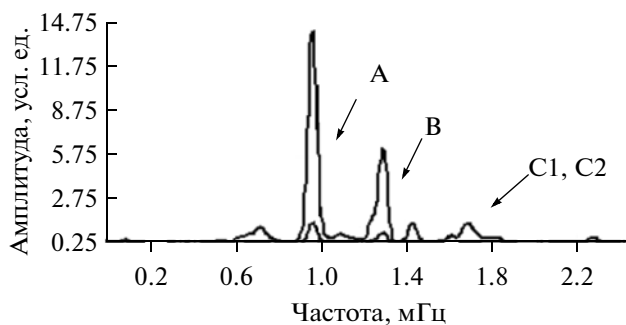


Рис. 4. Автокорреляционные спектры в Симеизе и Пушино для источника Orion KL.

сильный источник использовался для уточнения фазовых характеристик и офсетных параметров в каждом пункте наблюдений. Второй, более слабый объект, использовался для оценки интервала 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 оценка максимально достижимого интервала 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 около 700 с (на рис. 2 показаны потери при интегрировании сигнала в зависимости от времени на базе Симеиз–Пушино).

3.2. Эксперимент на длине волны 1.35 см. Минимальная длина волны наблюдений, планируемая в проекте “РадиоАстрон” – 1.35 см. Для проверки 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 $T_{\text{сис}}$ приведена с учетом вклада температуры атмосферы Земли в направлении на зенит. Зависимость $T_{\text{сис}}$ от угла места Z для станций Симеиз и Пушино приведена на рис. 3.

На рис. 4 приведены автокорреляционные спектры для источника Orion KL, зарегистрированный в Симеизе и Пушино для даты 8.V.2010 и

Таблица 1

Антенна	Система регистрации	$A_{эфф}, м^2$	$T_{сис}, К$	SEFD, Ян
Пушино	РДР-1	100	170	4680
Симеиз	Марк-5А	230	80	950
Космический телескоп	РДР-1	40	70	4800

13.00 UTC. Полоса отдельного спектрального канала $\Delta F = 3.9$ кГц, время накопления 1 мин.

Лучевые скорости и частоты компонент составили соответственно:

компонента А: $v = +12.2$ км/с (0.97 МГц);

компонента В: $v = +7.7$ км/с (1.30 МГц);

компонента С1, С2: $v = +2.5$ км/с, 0.5 км/с (1.7, 1.85 МГц).

На рис. 5 приведен спектр кросс-корреляции для источника Orion KL и даты 8.V.2010 и 13.15 UTC с учетом потерь при обработке и поглощения в атмосфере.

Как видно из рис. 5, с высокой достоверностью были зарегистрированы коррелированные отклики от компонент С1, С2 с амплитудами 0.018, 0.009 на частотах около 1.7 и 1.85 МГц.

В табл. 3 приведены данные коррелированной амплитуды для спектральных компонент А и В, исправленных за поглощение в атмосфере за три дня наблюдений.

В табл. 4 приведены антенная температура, коррелированный поток и функция видности для спектральных компонент А, В, С1 и С2 источника Orion KL.

Значения функции видности свидетельствуют о том, что размеры рассмотренных спектральных компонент в спектре радиоизлучения H_2O в источнике Orion KL превышают 20 мс.

3.3. 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-спектроанализатора 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 системы определялась по источникам с известными в данном диапазоне потоками: DR 21, Vir-A, Cyg-A, Tau-A и калибровочным ступенькам.

Таблица 2

Название	Симеиз	Пушино
Антенна, м	$D = 22$	$D = 22$
$A_{эфф}, м^2$	230	90
КИП (%)	50	20
$T_{sys} (z = 0^\circ), К$	130 (с атмосферой)	260 (с атмосферой)

Таблица 3

День наблюдений	Корр. амплитуда (исправлено за атмосферу и 1-бит квантование)		(В-А), 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

На рис. 6 приведены измеренные спектры источника Orion KL при настройке поляризатора на максимум (а) и минимум (б) поляризованного сигнала.

Как видно на рис. 6, в данный момент спектр источника состоит из семи основных компонент. Излучение компоненты с лучевой скоростью 7.7 км/с обнаруживает наличие степени линейной поляризации около 70% с позиционным углом плоскости поляризации около -20° .

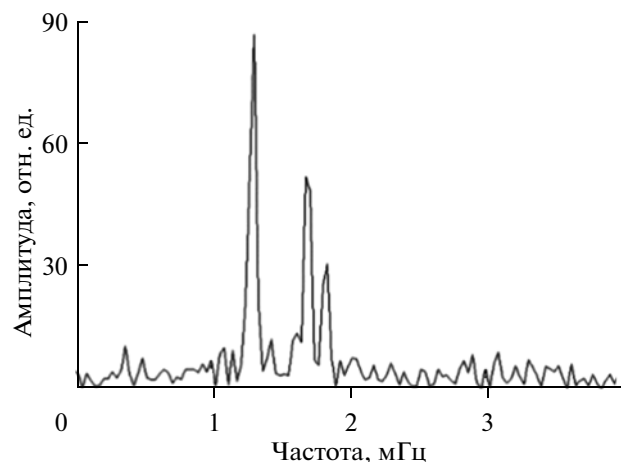


Рис. 5. Кросспектр радиоисточника Orion KL.

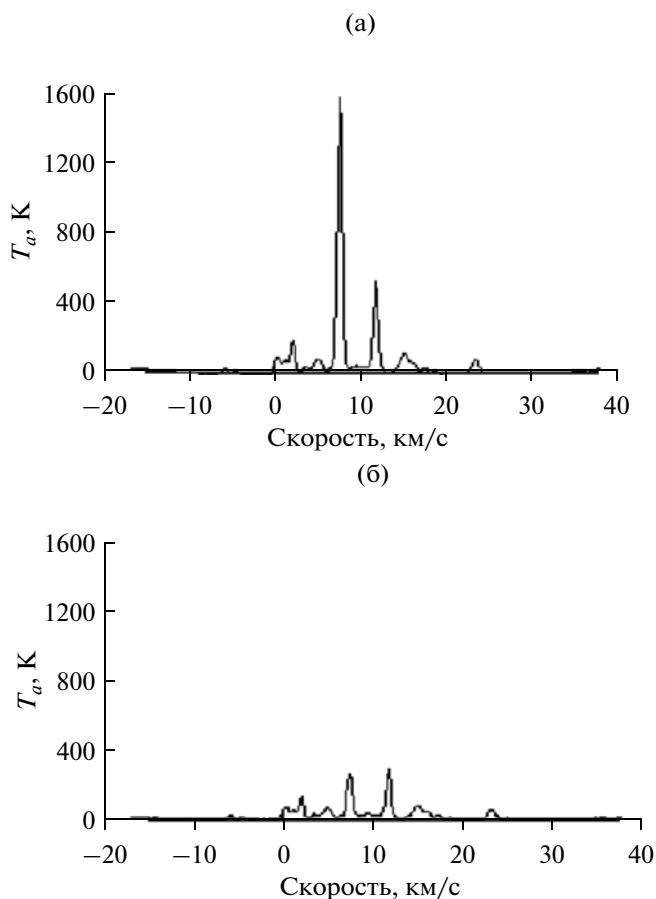


Рис. 6. Спектры источника Oigion KL

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 низкоско-

ростных, но был практически постоянным во времени для каждой отдельно взятой детали [2]. В ноябре 1991 г. источник находился в состоянии 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° [3].

По данным проведенных в близкую эпоху РСДБ наблюдений на базе Симеиз–Пушино в газопылевом комплексе Oigion KL выделен ряд активных зон. Размеры спектральных компонент в спектре радиоизлучения H_2O в Oigion KL превышают 20 мс.

4. ИНТЕРФЕРОМЕТР СИМЕИЗ–ЕВПАТОРИЯ

4.1. РСДБ эксперимент на длине волны 6 см. Наблюдения на базе Симеиз–Евпатория были выполнены в сентябре 2011 г. на длине волны 6 см. Регистрация данных производилась в Симеизе на дисковые регистраторы системы Марк-5А, а в Евпатории – на регистраторе АКЦ РДР-1 (формат RDF). Синхронизация систем в двух пунктах обеспечивалась водородными стандартами частоты и времени и системой синхронизации времени. Для наблюдений были выбраны шесть источников 3С286, 3С279, 3С454.3, DA193, 0420-014 и DR21 (для калибровки). Указанный набор объектов позволял провести оценку времени когерентности интерферометра Симеиз–Евпатория и калибровку комплексных коэффициентов усиления антенных элементов. Усредненные параметры радиотелескопов на волне 6 см приведены в табл. 5.

На рис. 7 и 8 приведены корреляционные отклики на длине волны 6 см для источников 3С279, 3С286 и 3С454.3, соответственно, с постоянной времени усреднения от 300 до 440 с. Полученное отношение сигнал/шум более 400. Высокое время когерентности интерферометра позволяет выполнять комплексное интегрирование на интервалах более 400 с и обеспечивать низкий уровень шума. Кроме того, указанные параметры интерферомет-

Таблица 4

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

Таблица 5

Антенна	Система регистрации	$A_{эфф}$, м ²	$T_{сис}$, К	SEFD, Ян
Евпатория (РТ-70)	РДР-1	2300	40	50
Симеиз (РТ-22)	Марк-5А	230	70	840
“РадиоАстрон” (КРТ-10)	РДР-1	40	70	4800

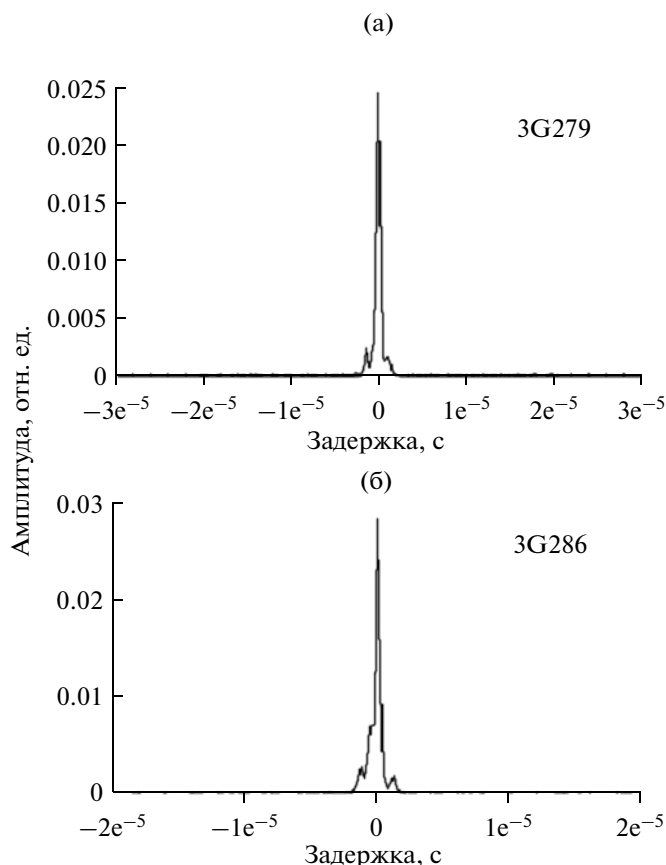


Рис. 7. Кросскорреляционные отклики для радиоисточников 3C279 и 3C286.

ра позволяют с высокой точностью оценивать комплексную амплитуду интерференции.

В табл. 6 приведены оценки коррелированных плотностей потоков на длине волны 6 см, сделанные по измеренным амплитудам коррелирован-

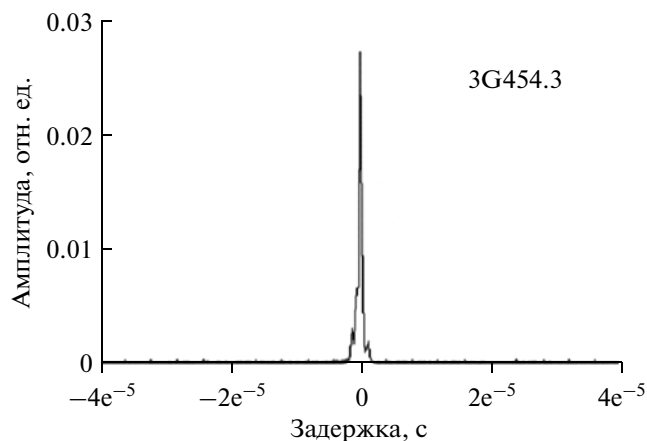


Рис. 8. Кросскорреляционный отклик для радиоисточника 3C454.3.

ного отклика при SEFD (Симеиз–Евпатория) равной 225 Ян.

4.2. Эксперимент на длине волны 18 см. Для проверки параметров модели наземного сегмента в этом диапазоне длин волн в сентябре 2011 г. был также проведен интерферометрический сеанс между радиотелескопами РТ-70 (Евпатория) и РТ-22 (Симеиз) на длине волны 18 см.

Для наблюдений были выбраны шесть источников – 3C286, 3C279, W75N, W3(OH), PSR0329 и 19DR21. Кроме решаемых задач, указанных в случае длины волны 6 см, включение в программу наблюдений источников W75 и W3(OH) позволяло оценить характеристики систем при наблюдении спектральных линий гидроксила OH. Параметры станций на длине волне 18 см приведены в табл. 7.

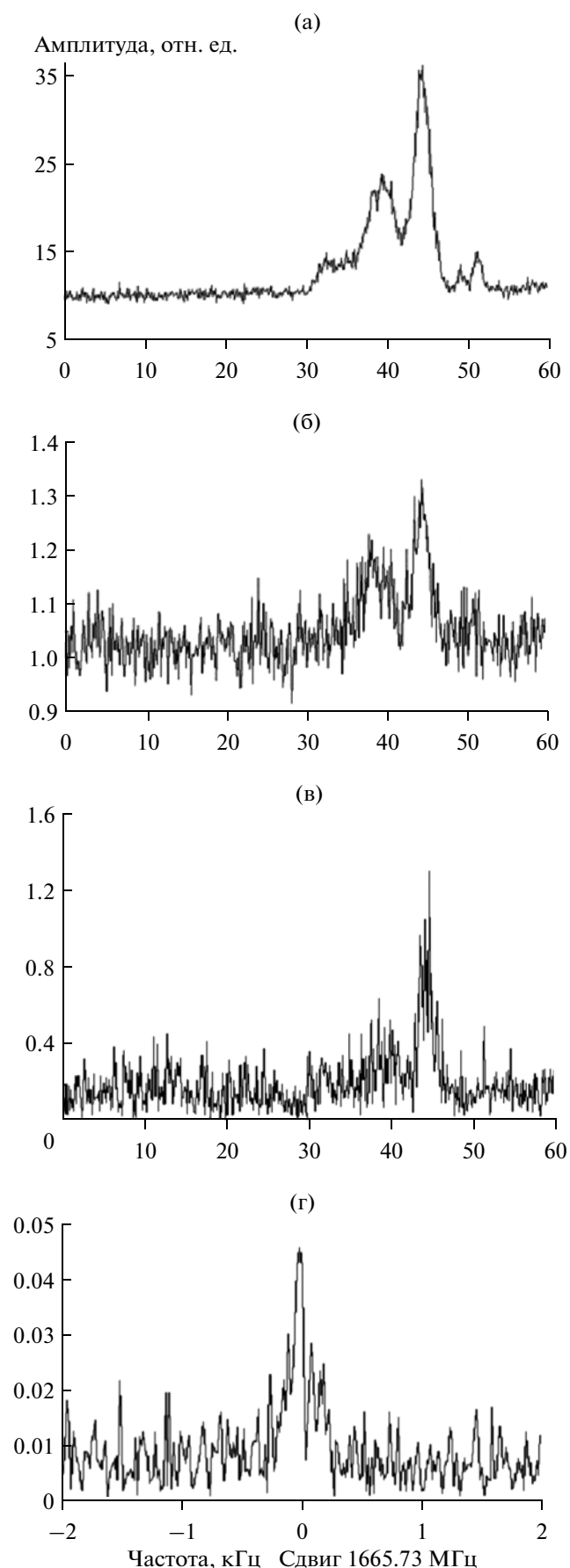
Результаты измерения автоспектра W3(OH) в Евпатории в правой круговой поляризации приведены на рис. 9а и на частоте 1665.5 МГц в левой

Таблица 6

Радиоисточник	Амплитуда корреляции	Коррелированная плотность потока, Ян	Полная плотность потока на волне 6 см, Ян
3C279	4.44×10^{-2}	9.90	13.0
3C286	2.35×10^{-2}	5.3	6.3
3C454.3	3.16×10^{-2}	7.1	16.0
DA193	2.52×10^{-2}	5.7	6.1

Таблица 7

Антенна	Система регистрации	$A_{\text{эфф}}, \text{ м}^2$	$T_{\text{сис}}, \text{ К}$	SEFD, Ян
Евпатория	РДР-1	2300	40	50
Симеиз	Марк-5А	230	70	840
Космический телескоп	РДР-1	40	50	3400



←
Рис. 9. Автокорреляционные спектры и кросспектры W3(OH) в Евпатории.

круговой поляризации (9б). Кросспектр W3(OH) Евпатория–Симеиз показаны на рис. 9в (в левой круговой поляризации) и 9г (в правой круговой поляризации).

Из рисунков видно, что реализованная чувствительность позволяет уверенно оценивать спектры W3(OH), в том числе и в круговой поляризации.

В качестве примера обработки данных на длине волне 18 см в континууме на рис. 10 приведен коррелированный отклик в зависимости от задержки для источника 3C279 в LSP. Постоянная времени усреднения ($\tau = 600$ с). Коррелированный поток составляет около 1.5 Ян при полной плотности потока 11 Ян. Положение пика отклика в задержке 0 мкс характеризует высокую точность вводимой при обработке модели задержки для станций интерферометра.

Анализ коррелированных данных в континууме показал высокую степень когерентности интерферометра Симеиз–Евпатория (так называемое время когерентности), что позволяет выполнять когерентное интегрирование при временах накопления до 600 с на длине волне 6 см и более 900 с на длине волны 18 см и тем самым реализовывать высокую чувствительность. Так, на длине волне 6 см флуктуационная чувствительность (ср. кв. откл.) при максимальном времени когерентного накопления (600 с) составляет около 3 мЯн.

ВЫВОДЫ

В тестовых наземных экспериментах проекта “РадиоАстрон” на волнах 18, 6 и 1.35 см получены и прокалиброваны амплитуды, фазы кросскорреляционных функций и их временные зависимости. Продемонстрировано соответствие расчетных параметров аппаратных средств радиотелескопов и их готовность к участию в дальнейших интерферометрических сеансах. По результатам обработки на корреляторе АКЦ ФИАН сделаны следующие выводы:

1. Параметры чувствительности и когерентные свойства интерферометров, реализованных на длинах волн 18, 6 и 1.35 см, соответствуют расчетным для реализованных технических показателей использованных антенных систем.

2. Интерферометрические сеансы свидетельствуют о соответствующей готовности РТ-70 (Евпатория) к участию пункта в наземно-космических экспериментах на длинах волн 6 и 18 см.

3. Эксперимент с эмуляцией параметров бортового радиоастрономического комплекса свидетельствует о возможности выделения на интерфе-

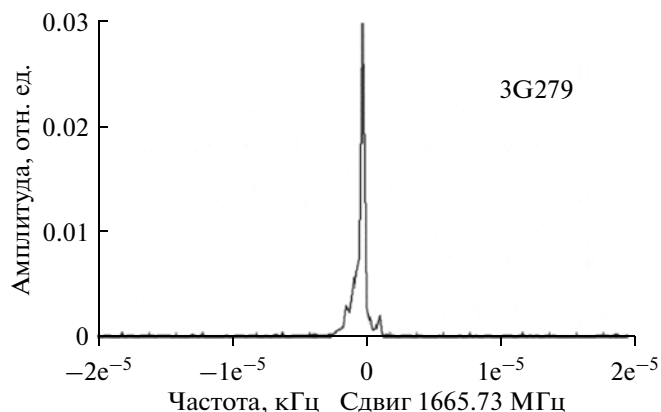


Рис. 10. Кросскорреляционный спектр радиоисточника 3G279, 18 см.

рометре Симеиз-КРТ10 сигналов с коррелированным потоком около 100 мЯн при времени когерентного интегрирования около 10 с при соотношении сигнал/шум около 10 и полосе сигнала 4 МГц.

4. 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.

5. Введение в действие спектрально-поляриметрического Фурье анализатора на станции Симеиз позволило проводить систематические и комплексные поляризационные исследования областей звездообразования.

Проект “РадиоАстрон” осуществляется Астро-космическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и НПО им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно со многими научно-техническими организациями России и других стран.

Авторы выражают признательность С.Ф. Лихачеву за творческую поддержку в процессе проведения экспериментов и корреляционной обработки интерферометрических данных на программном процессоре АКЦ ФИАН. Авторы также выражают искреннюю благодарность сотрудникам РИ НАН Украины и НЦУКС за обеспечение работы антенно-приемного комплекса РТ-70 во время проведения наблюдений, И.Д. Стрелка за подготовку приемной аппаратуры, персоналу пульта управления РТ-22 (Симеиз) за помощь в проведении наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кардашев Н.С., Хартон В.В., Абрамов В.В. и др. “РадиоАстрон” – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. 2013. Т. 90. № 3. С. 179–222.
2. Вольвач А.Е., Матвеев Л.И., Нестеров Н.С. Спектрально-поляриметрические наблюдения линии H_2O (1.35 см) в Орионе KL // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. 1995. Т. 89. С. 108–110.
3. Матвеев Л.И., Грэм Д., Даймонд Ф. Область вспышка излучения H_2O мазера в Орионе KL // Письма в Астрон. журн. 1988. Т. 14. № 10. С. 1101–1122.