

ПРЕПРИНТ

18

И. Д. ЛИТОВЧЕНКО, А. В. АЛАКОЗ, С. Ф. ЛИХАЧЕВ, В. И. КОСТЕНКО, А. В. ИПАТОВ, А. М. ФИНКЕЛЬШТЕЙН

ПОСТКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА РАДИОСПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ЧАСТОТЫ ИНТЕРФЕНЦИОННЫХ ЛЕПЕСТКОВ

Москва 2012

АБСТРАКТ.

Представлены результаты наблюдений мазерного источника W3(OH) на длине волны 18 см, проведенных в рамках предполетной подготовки космической миссии Радиоастрон на наземном интерферометре "КВАЗАР" с эмуляцией космического плеча с помощью 22-м радиотелескопа в Пущино (РФ). Система интерферометра объединяет три 32-м антенны в географических пунктах Бадары-Светлое-Зеленчукская, РФ. Максимальная длина базы составляет около 4402 км, что обеспечивает пространственное разрешение около 0.009 секунд дуги. Данные регистрировались на регистраторе МК5 (32-м радиотелескопы) и системе RDR (Radioastron Digital Recorder) в Пущино. Корреляционная обработка выполнялась на универсальном программном корреляторе Астрокосмического центра ФИАН, выходные данные которого имеют формат, совместимый с форматом пакета AIPS. Методом анализа частоты интерференции для групп каналов, объединяющих наиболее яркие спектральные детали на эпоху наблюдений, получены координаты для 45 пространственных деталей относительно заданной коррелятором центра карты. Сравнение данных наблюдений в этом эксперименте с данными, полученными в результате тестовых наблюдений W3(OH) в проекте Радиоастрон с космическим телескопом на борту спутника, позволяет определить верхний предел на яркостную температуру мазерных пятен и нижний предел на их размер:

 $T_b ~<~ 7.5~ \times ~10^{12}~{
m K,~d} > 1.4~{
m a.e.}$

POST-CORRELATION PROCESSING OF THE RADIOSPECTROSCOPIC DATA USING A FRINGE-RATE ANALYSIS, by I. D. Litovchenko, A. V. Alakoz, V. I. Kostenko, S. F. Likhachev, A. V. Ipatov and A. M. Finkelstein.

The results of observations of maser source W3(OH) at a wavelength 18 cm are presented. The observations have been carried under the pre-launch preparation of space mission Radioastron. Ground interferometer "QUASAR" has been used with the emulation of the space shoulder using 22-m radio telescope in Pushchino (Russian Federation). Interferometer system was combined from three 32-m antenna in geographical locations Badary-Zelenchukskaya-Svetloe, RF. The maximum length of the base is about 4402 km, which provides spatial resolution of about 0.009 arc seconds. Data were recorded on the recorder MK5 (32-m radio telescopes) and on the system RDR (Radioastron Digital Recorder) in Pushchino. Correlation processing was performed with the correlator of Astro Space Center of the Lebedev Physical Institute, the output format of which is compatible with the format of AIPS package. By analysis of interference frequency for groups of channels which combine the most striking spectral features in the observation period, the coordinates were obtained for 45 spatial details on the frequency which the correlator sets as the center of the map. The comparison of the results of observations in this experiment with the data obtained from the test observations of W3(OH) in the Radioastron project with space telescope on the board of the satellite permits to determine the top limit on the brightness temperature of the maser spots and the lower limit on its size:

 $T_b ~<~ 7.5~ imes~10^{12}~{
m K,~d} > 1.4~{
m a.e.}$

1 Постановка задачи.

Одним из методов исследования областей звездообразования является метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), который был впервые применен более 50 лет назад и в последние годы получил очень широкое использование в наземных радиоастрономических экспериментах.

Сущность метода РСДБ состоит в независимой регистрации на нескольких удаленных радиотелескопах недетектированного сигнала от исследуемого источника с последующей совместной обработкой данных в специализированном корреляционном центре, где определяется корреляция поля принятых радиоволн между всеми возможными парами радиотелескопов. Для того, чтобы такая корреляция зарегистрированных сигналов была возможна, необходимо обеспечить высокоточную привязку времени и частоты на всех радиотелескопах, что достигается использованием водородных стандартов. Во время РСДБ-наблюдений взаимное расположение радиотелескопов по отношению к направлению на исследуемый источник медленно изменяется вследствие вращения Земли. Соответственно, изменяется со временем и корреляция поля принимаемого радиоизлучения между парами радиотелескопов.

Последующий анализ карты комплексного коэффициента корреляции в картинной плоскости (плоскость, перпендикулярная направлению на исследуемый радиоисточник, или UV-плоскость) позволяет сделать определенные заключения о структуре исследуемого источника. Если в наблюдениях принимали участие много радиотелескопов и в течение достаточно долгого времени, то можно восстановить изображение источника с высоким угловым разрешением, которое определяется расстоянием между наиболее далекими радиотелескопами. Угловое разрешение наземных систем РСДБ ограничивается размером Земного шара и составляет около 300 микросекунд дуги на частоте 22.2 ГГц (длина волны 1.35 см).

Однако в большинстве радиоисточников, исследованных наземными сетями РСДБ, были обнаружены яркие компактные детали, которые требовали для своего изучения существенного улучшения углового разрешения, что возможно только при использовании в качестве одного из элементов РСДБ-сети космического радиотелескопа на орбите искусственного спутника Земли.

В 1997 году Институтом космических исследований Японии совместно с японским космическим агентством JAXA был осуществлен успешный запуск такого радиотелескопа, который имел диаметр 8 метров (программа VSOP). Период обращения спутника VSOP составляет около 6 часов, а максимальная высота над поверхностью Земли достигает в апогее 20000 км, что обеспечивает почти троекратное улучшение углового разрешения этого наземнокосмического интерферометра по сравнению с наземными РСДБ-сетями. Однако из-за неисправности в бортовом научном комплексе VSOP самый перспективный коротковолновый диапазон 22.2 ГГц в наблюдениях не использовался, и наилучшее угловое разрешение на самой короткой рабочей волне VSOP (6 см) составило те же 300 микросекунд, что и на наземных сетях в диапазоне 22.2 ГГц. Таким образом, реализация проекта VSOP не привела к достижению запланированного рекордного углового разрешения.

В то же время программа VSOP наглядно продемонстрировала практическую реализацию сложнейшего научно-технического эксперимента, включающего в себя синхронизацию времени и частоты на борту КА, высокоточное определение параметров орбиты, широкополосную линию передачи на Землю научной информации, корреляцию зарегистрированных данных с учетом орбитального движения космического плеча интерферометра. Анализ научных данных, полученных в проекте VSOP, показал, что среди исследованных радиоисточников имеется много объектов, для изучения строения которых необходимо существенное улучшение углового разрешения. Такое улучшение углового разрешения обеспечивает проект Радиоастрон.

Наличие четырех частотных диапазонов в проекте Радиоастрон позволяет исследовать в разных частотных диапазонах различные типы радиоисточников – в том числе, мазерные источники ОН в линии 1665.402 МГц и в линии водяного пара H_2O на частоте 22.235 08 ГГц, ассоциирующиеся с протозвездами и протопланетными дисками. Следует отметить, что диапазоны 0.327 ГГц и 22.220 ГГц отсутствовали в первом космическом проекте VSOP. Исследования с наземно-космическим интерферометром в этих диапазонах впервые проводятся в программе Радиоастрона. Наиболее перспективным диапазоном частот, несомненно, является диапазон 22.220 ГГц, где будет реализовано наилучшее угловое разрешение.

По результатам наблюдений кандидатов в мазеры в областях образования звезд можно определить их координаты, размеры и яркостную температуру. С помощью этих данных будет выявлена природа источников, то есть будет определено, какие из них действительно являются мазерами. Теоретическая оценка надежности существующих моделей накачки космических мазеров и сравнение их с результатами наблюдений позволит выявить те модели, которые адекватно описывают результаты наблюдений, и отсеять остальные.

Международный проект наземно-космического радиоинтерферометра Радиоастрон разрабатывался по инициативе АКЦ ФИАН (Постановление Правительства РФ от 22.10.2005, №635 - сайт http://www.federalspace.ru/science06 15.asp). В подготовке и0 реализации проекта принимают участие зарубежные научные и технические организации из Европы, США, Австралии и Индии. С техническими характеристиками проекта можно познакомиться на сайте http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html и в статье [1]. Изготовление, испытания, запуск и управление космическим аппаратом (КА) осуществляется НПО им Лавочкина. В проекте принимает участие целый ряд радиотелескопов большого диаметра, работающих в открытом доступе по конкурсным научным заявкам для ученых всего мира – например, GBT (Green Bank Telescope) – 100-м радиотелескоп обсерватории Грин Бэнк НРАО, США (в настоящее время самый современный и высокочувствительный полноповоротный радиотелескоп), 100м радиотелескоп в Эффельсберге (Германия), 76-м радиотелескоп обсерватории Джодрел Бэнк (Англия), 70-м антенна Центра дальней космической связи Национальной Академия Наук Украины (НАНУ), 32-м радиотелескопы Института Прикладной Радиоастрономии Российской Академии Наук, (Россия). Эти телескопы будут принимать участие в сопровождении научной программы проекта Радиоастрон.

Кроме того, в проекте участвует сеть коллективного пользования EVN (European VLBI Network) – объединение радиоастрономических обсерваторий Европы и ряда стран Азии и Африки для совместного осуществления РСДБ наблюдений http://www.evlbi.org.

Отработка методики исследований с наземно-космическим радиоинтерферометром выполнялась до запуска космического радиотелескопа по выбранным типичным радиоисточникам на наземной сети РСДБ. С этой целью проводились наземные предполетные РСДБ наблюдения избранных галактических и внегалактических радиоисточников на российских и зарубежных радиотелескопах. Такие сопутствующие наблюдения также дают информацию о текущем поведении объекта (активном или спокойном), важную при интерпретации характеристик пространственной структуры, полученной методом РСДБ. Эта дополнительная информация, а также предварительная проверка разработанной методики измерений и ее коррекция по результатам испытаний значительно повышают качество выполняемых исследований и качество научных результатов.

2 Выбор источника.

Для тестовых предстартовых наблюдений мазеров при наличии в системе радиотелескопов космического плеча был выбран источник W3(OH) – хорошо известная ультракомпактная зона HII (1.5"в диаметре) в области образования массивных звезд. Предполагается, что внут0ри UCHII находится скрытая пылью очень молодая звезда класса О массой от 30 до 50 масс Солнца. Источник имеет много мощных быстропеременных мазерных компонентов OH и H₂O, что обеспечивает хорошую возможность для статистических исследований мазерных пятен с различными характеристиками. В настоящее время, учитывая переменность мазеров, W3(OH) является одним из самых сильных гидроксильных мазеров – до 200 Ян коррелированного на VLA потока в пике линий OH [2]. Нестандартная морфология расположения OH мазеров – только в западной части оболочки – дает основания для обсуждения многих моделей области: формирование мазеров на фронте взаимодействия расширяющейся оболочки с окружающим молекулярным облаком; коллапс остатков протозвездной материи на протозвезду, не вовлеченных в процесс образования UCHII; процесс развития биполярного потока ("*champagne flows*") или кометарной туменности. РСДБ-наблюдения и построение повторных карт мазерных пятен ("*remap*") является ключом к решению этой интересной астрофизической проблемы, особенно при систематическом изучении собствнных движений пространственных компонентов (подробнее с0м., например, [3] и ссылки в этой работе).

3 Предстартовые наземные наблюдения.

Наземные предполетные наблюдения источника W3(OH) с имитацией космического плеча состоялись 2-3 февраля 2011 г.

В эксперименте приняли участие три 32-метровых полноповоротных рефлектора Института Прикладной Астрономии РАН, расположенные в следующих пунктах:

- 1. Антенна в п. Светлое (Ленинградская область) (
 $\phi=60^\circ 32',\,\lambda=29^\circ 47',\,h=86m).$
- 2. Антенна в ст. Зеленчукская (Карачаево-Черкесская АО) ($\phi = 43^{\circ}47', \lambda = 41^{\circ}34', h = 1175m$).
- 3. Антенна в п. Бадары (Алтайский край) ($\phi=51^\circ 46', \, \lambda=102^\circ 14', \, h=813m).$

Эти три новых антенны построены в первой половине 2000-х годов и постоянно используются для РСДБ-наблюдений. Работая совместно, эти телескопы образуют российскую РСДБ-сеть радиотелескопов "КВАЗАР". Они имеют 5 двухканальных (левая и правая поляризация) приемников для диапазонов длин волн: 1.35 см (К-диапазон), 3.5 см (Х-диапазон), 6.2 см (С-диапазон), 13 см (S-диапазон) и 18-21 см (L-диапазон). Регистраторы – Mark5B. SEFD (System Equivalence Flux Density0) этих антенн в L-диапазоне составляет примерно 280 Ян.

Максимальная длина базы Бадары-Светлое составляет около 4402 км, что обеспечивает пространственное разрешение около 0.009 секунд дуги на длине волны 18 см.

Для моделирования космического телескопа Радиоастрон использовался радиотелескоп РТ-22 в Пущино (Московский регион) ($\phi = 54^{\circ}49', \lambda = 37^{\circ}38',$

h = 239m). На нем установлены приемники для K,C,L и 92 cm (Р-диапазон). PT-22 имеет эффективную площадь около 100 м².

РТ-22 ПРАО АКЦ ФИАН обеспечивает научные наблюдения и работу Наземной станции слежения (СС), или "Tracking station"(TC). Этот телескоп используется как приемная антенна Наземной станции слежения проекта Радиоастрон. В предполетный период РТ-22 использовался как наземный радиотелескоп для тестовых и научных наблюдений.

Наземная станция слежения приема научной информации (CC) является ключевым элементом наземно-космического интерферометра. СС принимает по радиолинии научные данные с космического аппарата со скоростью 144 Мбит/с и осуществляет декодирование и регистрацию этих данных. СС также обеспечивает синхронизацию частоты бортового научного комплекса.

В данном наземном эксперименте для записи сигнала в Пущино использовался регистратор Радиоастрона (см. ниже). С целью моделирования космического телескопа SEFD пущинского PT-22 в L-диапазоне был понижен до 1000 Ян путем внесения затухания в сигнал от антенны на входе МШУ.

Всего было выполнено четыре 10-минутных скана наблюдений источника W3(OH) (время UT):

- 1. 02.02 18:12:07 02.02 18:21:42;
- 2. $02.02 \ 20:37:34 02.02 \ 20:47:09;$
- 3. $02.02 \ 22:29:44 02.02 \ 22:39:20;$
- $4. \ 03.02 \ 00:43:29 \ \ 03.02 \ 00:53:04.$

При проведении наблюдений гетеродин был настроен на 1660 МГц, регистрировалась верхняя и нижняя полосы шириной по 16 МГц. С целью дальнейшей обработки использовалась только верхняя полоса, содержащая мазерные линии.

4 Статус проекта Радиоастрон.

Космический радиотелескоп Радиоастрон был запущен с космодрома Байконур в 18 июля 2011 г. На борту космического аппарата 23 июля была успешно развернута 10-метровая антенна. С этого момента для телескопа на орбите проводились тестовые измерения. В частности, на борту был включен водородный мазерный стандарт, который работает в нормальном режиме, параметры орбиты определяются, радиометры были включены, и все бортовые системы работают в рамках заданных параметров. Было установлено, что температура во всех четырех диапазонах (P, L, C и K) близка к спецификациям. Проведены измерения потока от радиоисточика Кассиопея А на 92 см и на 18 см. Эффективная площадь соответствует ожидаемой (см. Руководство для пользователей Радиоастрона, представленное в открытом доступе на сайте http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf). Информация о состоянии проекта Радиоастрон обновляется регулярно в бюллетенях новостей на сайте http://www.asc.rssi.ru/radioastron/newsletter/newsl.html .

Космический радиотелескоп Радиоастрон находится на лунно-возмущенной орбите, на которой орбитальные элементы были выбраны так, чтобы максимизировать их эволюцию под действием слабого гравитационного возмущения от Луны и Солнца. Орбита должна иметь баллистическое время жизни больше 9 лет, а для поддержания нормальной радиосвязи орбитальный космический радиотелескоп не должен находиться в тени Земли более двух часов. Начальный период обращения по орбите составляет около 8.5 суток. Высота перигея будет варьироваться от 650 км до 65000 км, высота апогея - от 265000 до 360000 км, а эксцентриситет орбиты будет изменяться в пределах от 0.59 до 0.96. Характерный период этих колебаний составляет около трех лет.

В конце января и в феврале 2012 г. состоялись первые эксперименты в рамках ранней научной программы миссии Радиоастрон. 31 января 2012 г. с 12 до 13 часов UT состоялся эксперимент в диапозоне L. Планировались одновременные наблюдения мазерного источника гидроксила W3(OH) совместно с космическим радиотелескопом Радиоастрн, наземной интерферометрической сетью "KBA3AP" и Евпаторийским радиотелескопом РТ-70. По причин плохой погоды в Евпатории наблюдения на РТ-70 не состоялись. Проекции баз космос-Земля для источника W3(OH) в ходе этого эксперимента составили примерно 4 диаметра Земли. Использовались те же настройки гетеродина и регистрировалась та же полоса, что и в эксперименте 2–3 февраля 2011 г. на наземном интерферометре "KBA3AP".

5 Обработка данных наблюдений.

5.1 Первичная корреляционная обработка.

Радиотелескоп РТ-22 Пущинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН оснащен специальной системой регистрации научных данных (РДР, или RDR – Radioastron Digital Recorder), разработанной в АКЦ ФИАН. 0 Для обеспечения работ с наземно-космическим радиоинтерферометром Радиоастрон в АКЦ ФИАН был изготовлен и испытан Программный цифровой коррелятор (ПК) для обработки интерферометрических данных, работающий на базе 40-ядерного кластерного компьютера. Этот коррелятор позволяет проводить обработку данных с КРТ и до 10 наземных радиотелескопов одновременно в квазиреальном масштабе времени. Спецификации коррелятора представлены в документе «Радиоастрон. Руководство пользователя» http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf и в статьях [1], [4].

ПК представляет собой основной элемент системы обработки данных в РСДБ наблюдениях. ПК осуществляет одновременный ввод нескольких потоков данных с регистраторов, временное выравнивание данных, компенсацию частот интерференции между парами станций, вычисление корреляционных функций (т.е. кросспектров) и их накопление с заданным темпом усреднения. Дальнейшая обработка выходных данных коррелятора (посткорреляционная обработка) проводится уже программными пакетами общего назначения (типа ASL, AIPS или DIFMAP).

Для посткорреляционной обработки результатов эксперимента 2-3 февраля 2011 г. была взята парциальная полоса частот 1665 МГц — 1668.002 МГц шириной 3.002 МГц, в которой содержалось 6148 узких каналов шириной 0.4883 кГц (0.088 км/с).

Автокорреляционные спектры источника W3(OH) с четырех антенн, принявших участие в эксперименте, представлены на рис. 1. Эти спектры используются для диагностики наличия сигнала, оценки работоспособности приемной аппаратуры и качества первичных данных.

Для посткорреляционной обработки результатов эксперимента 31 января 2012 г. была взята парциальная полоса частот 1665 МГц — 1667.703 МГц шириной 2.703 МГц, в которой содержалось 2768 узких каналов шириной 0.9766 кГц (0.176 км/с).

5.2 Посткорреляционная обработка данных.

В настоящее время в открытом доступе имеется большой набор программных продуктов для первичной обработки и комплексного анализа астрономических данных. В данном проекте мы используем пакет AIPS (Astronomical Imaging Processing System) – многоцелевое программное обеспечение для построения и анализа интерферометрических изображений (http://aips2.nrao.edu/docs/ aips++.html). Оно установлено на компьютерах отдела Космической радиоастрономии АКЦ ФИАН и используется в рутинном режиме.

На рис. 2–5 представлены полные кросскорреляционные спектры источника W3(OH) в главной мазерной линии OH на частоте 1665 МГц как в частотных каналах, так и по скоростям относительно локального стандарта покоя в правой и левой поляризации.

Для построения спектров использовалась задача AIPS/POSSM со стандартными установками.

6 Пространственная структура мазера – метод анализа частоты интерференции.

Для построения карты мазера W3(OH) по наблюдениям от 2–3 февраля 2011 г. использовался метод анализа частоты интерференции, для которого в пакете AIPS в середине 90-х годов появился специальная задача FRMAP [5]. Картографирование методом анализа частоты интерференции подробно рассматривается в работе [6].

Суть метода заключается в следующем. Если каждая спектральная линия космического мазера имеет пространственную структуру из разнесенных компактных деталей, то для каждого частотного канала корреляционная обработка даст спектр частоты интерференции с количеством пиков, равным количеству пространственных деталей в этом канале – см. рис. 6.

В спектрах частоты интерференции могут возникать случайные максимумы. Для того, чтобы их отсечь, в задаче FRMAP есть параметр bparm(1), который задает уровень σ (среднее значение для спектра) для отсечения ложных пиков в спектре. В данном эксперименте было взято значение bparm(1)=3.

Разница между частотой интерференции ω_f и нулевой частотой (частотой фазового центра) подчиняется уравнению:

$$\omega_f = 2\pi \left(\frac{du}{dt}x + \frac{dv}{dt}y\right)$$

Таким образом, знание частоты интерференции для спектральной линии, полученной на одной базе, дает прямую в пространстве угловых координат, на которой расположена мазерная деталь.

При пересечении нескольких таких прямых от разных баз можно получить угловые координаты (т.е. карту) для каждой пространственной детали, входящей в состав спектральной линии. Чем больше этих прямых, сформированных разными базами, и чем больше различие в углах, под которыми они пересекаются, тем более точные координаты будут получены.

Используя этот метод, были получены координаты пространственных деталей для каждой спектральной линии Ra-Re и La-Le в источнике W3(OH) в левой и правой поляризации – всего 45 деталей. Примеры применения нашего метода проиллюстрированы на рис. 7–12. Параметры всех 45 деталей приведены в таблице.

7 Обсуждение результатов.

Хотя предполетные наблюдения преследуют технические цели, они содержат и научные результаты о пространственной структуре исследованных радиои-

сточников.

Качество данных посткорреляционной обработки и относительных координат мазерных деталей, полученных методом анализа частоты интерференционных лепестков, позволяет использовать их для астрофизического анализа и сделать сопоставление с результатами наблюдений мазерного источника W3(OH) в более ранние эпохи на сетях РСДБ.

На рис. 13 приведена карта карта мазерных пятен источника W3(OH) на частоте 1665 МГц по данным двух экспериментов, выполненных 1) на наземном российском интерферометре "KBA3AP" с эмуляцией космического плеча с помощью Пущинского радиотелескопа и 2) на наземной сети VLBA (США) [7].

Из рисунка видно, что мазерные пятна образуют компактные группы, данные обоих экспериментов совпадают в пределах точности определения координат.

При обработке второго эксперимента – наблюдений от 31 января 2012 г. – интерференционных лепестков для наземно-космических баз интерферометра найти не удалось. Также, как и в первом эксперименте, обрабатывалась главная линия мазера ОН на частоте 1665 МГц.

Базы интерферометра показаны на рисунке 14. Разрешение для наземнокосмических баз в 260 М λ составило ~0.7 mas. Предыдущие интерферометрические наблюдения [8] 2004 г. и [7] 2006 г. на решетке VLBA имели разрешение порядка 8 mas. Чувствительность системы космос-Земля в этом эксперименте оказалась сильно заниженной из-за того, что в наблюдениях по причине плохих погодных условий не смог принять участие 70-м телескоп в Евпатории.

Чувствительность системы (поток, который возможно было бы продетектировать), рассчитывалась по формуле

$$S_{\nu} = \frac{1}{n} SNR \sqrt{\frac{SEFD_e SEFD_s}{2 \Delta t \Delta \nu}},$$

где *n* - коэффициент потери чувствительности из-за клипирования данных, который равен 0.67 для комбинации двухбитного наземного и однобитного космического клипирования;

SNR - уровень превышения сигнала над шумом – полагаем, что он равен 5 для надежного детектирования сигнала;

 $SEFD_e$ – SEFD наземного телескопа $\sim 280~{\rm Ян},$ а $SEFD_s$ - SEFD космического телескпа $\sim 3400~{\rm Ян};$

 Δt время интегрирования сигнала, ограниченное временем когерентности и длиной скана - 300 сек;

 $\Delta\nu$ - ширина линии, которая для источника W3(OH) составляет от 0.15 до 0.38 км/с [7]. Для расчета чувствительности мы взяли значение 0.2 км/с, или

1.11 kHz.

Итоговая оценка чувствительности детектирования сигнала составила $S_{\nu}~\sim 8.9~{\rm Sh}.$

Оценим яркостную температуру, которую должен иметь источник, если он будет обнаружен интерферометром с такой чувствительностью, используя формулу

$$T_b = \frac{S_{\nu} \lambda^2}{2.65 \theta^2} ,$$

где λ – длина волны перехода в сантиметрах - 17.44 см;

 θ — угловое разрешение наземно-космического интерферометра 0.7 mas, переведенное в угловые минуты;

 S_{ν} - чувствительность наземно-космического интерферометра в Янских.

Получаем, что для детектирования сигнала в источнике W3(OH) в мазерных деталях должна была бы быть яркостная температура

 $T_b > 7.5 \times 10^{12} \text{ K}.$

Так как интерференционный отклик не был обнаружен, то

 $T_b < 7.5 \times 10^{12} \text{ K}.$

Эту цифру можно сравнить с данными из статьи [7], в которой самая яркая деталь в мазере W3(OH) имеет поток 92 Ян или – в пересчете на яркостую температуру –

 $T_b > 4.8 \times 10^{11} \text{ K}.$

Сравнение позволяет сделать предположение, что даже самые яркие мазерные детали разрешаются на тех наземно-космических базах, которые были задействованы в ходе данного эксперимента.

Таким образом,

 $4.8 \times 10^{11} < T_b < 7.5 \times 10^{12} \text{ K. 0}$

8 Выводы.

В результате наблюдений мазерного источника W3(OH), проведенных в рамках предполетной подготовки космической миссии Радиоастрон на наземном интерферометре "KBA3AP" с эмуляцией космического плеча с помощью 22-м радиотелескопа в Пущино (РФ), получены автокорреляционные и кросскорреляционные спектры источника.

С помощью пакета AIPS методом анализа частоты интерференции для групп каналов, объединяющих наиболее яркие спектральные детали на эпоху наблюдений, получены координаты для 45 пространственных деталей относительно фазового центра. Сравнение данных наблюдений в этом эксперименте с данными, полученными в результате тестовых наблюдений W3(OH) в проекте Радиоастрон с космическим телескопом на борту спутника, позволяет определить верхний предел на яркостную температуру мазерных пятен и нижний предел на их размер для разрешения в наземно-космическом интерферометре 0.7 mas:

 $T_b < 7.5 \times 10^{12} \text{ K, d} > 1.4 \text{ a.e.}$

В оценке размера расстояние считалось равным 1.95 кпк [9].

Показано, что намеченная методика обработки выходных данных с наземных интерферометров с помощью Программного цифрового коррелятора Астрокосмического Центра успешно реализуется, и формат выходных данных коррелятора совместим с форматом данных, который используется в общепринятом программном пакете AIPS, предназначенном для посткорреляционной обработки интерферометрических наблюдений. Это программное обеспечение AIPS протестировано многолетним использованием на различных обсерваториях и гарантирует получение достоверных сведений о структуре компактных радиоисточников.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-02-00147а), Программы фундаментальных исследований ОФН РАН "Активные процессы и стохастические структуры во Вселенной-2010, 2012" а также при поддержке со стороны Министерства образования и науки в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" 2009 – 2013 г.г. в форме госконтракта – ГК № 16.740.11.0155 и грантом в форме субсидии – Соглашение № 8405.

Список литературы

- [1] В. Ю. Авдеев, А. В. Алакоз, Ю. А. Александров, В. В. Андреянов и др. Вестник НПО им. С. А. Лавочкина **14**, 4 (2012).
- [2] A. L. Argon, M. J. Reid, and K. Menten, Astrophys. J. Suppl. Ser. 129, 159 (2000).
- [3] E. E. Bloemhof, M. J. Reid, and J. M. Moran, Astrophys. J. **397**, 500 (1992).0
- [4] Н. С. Кардашев., В. В. Хартов, В. В. Абрамов, В. Ю. Авдеев, А. В. Алакоз и др. Астрон. журн., принято в печать (2012).
- [5] L. Kogan, Astronomical Data Analysis Software and Systems V ASP Conference Series, 101 (1996).
- [6] R. C. Walker, Astron. J. 86, 1323 (1981).

- [7] V. L. Fish, W. F. Brisken, and L. O. Sjouwerman Astrophys. J. 647, 418 (2006).
- [8] M. M. Wright, M. D. Gray, and P.J. Diamond MNRAS 350, 1253 (2004).
- [9] M. J. Reid, K. M. Menten, X. W. Zheng, A. Brunthaler *et al.*, Astrophys. J. 700, 137 (2009).



Рис. 1: Автоспектры источника W3(OH) на частоте 1665 МГц. По оси X отложены спектральные каналы. По оси Y – амплитуда произвольных единицах. Порядковые номера в правом верхнем углу каждого графика: 1 – спектр с антенны в Пущино и далее – в Бадарах, в Светлом и в Зеленчукской. Спектры показаны с убыванием каналов по оси X, что соответствует увеличению скорости относительно локального стандарта покоя.



Рис. 2: Суммарный кросс-спектр правой круговой поляризации источника W3(OH). По оси X отложены частотные каналы. По оси Y – коррелированный поток в Янских.



Рис. 3: Суммарный кросс-спектр левой круговой поляризации источника W3(OH). По оси X отложены частотные каналы. По оси Y – коррелированный поток в Янских.



Рис. 4: Суммарный кросс-спектр правой круговой поляризации источника W3(OH). По оси X отложена скорость относительно локального стандарта покоя в км/с. По оси Y – коррелированный поток в Янских. Наиболее яркие детали спектра обозначены как Ra, Rb и далее по аналогии.



Рис. 5: Суммарный кросс-спектр левой круговой поляризации источника W3(OH). По оси X отложена скорость относительно локального стандарта покоя в км/с. По оси Y – коррелированный поток в Янских. Наиболее яркие детали спектра обозначены как La, Lb и далее по аналогии.



Рис. 6: Спектр частоты интерференции для одной из баз (Бадары-Зеленчукская) и для одного спектрального канала мазера ОН в источнике W3(OH). По оси X отложена частота интерференции, 0 соответствует частоте, скомпенсированной коррелятором по своей модели, по оси Y – амплитуда сигнала на базе в Янских.



Рис. 7: Прямые, соответствующие решению уравнения частоты интерференции, полученного по нескольким сканам, в 1108-ом спектральном канале в правой круговой поляризации – мазер ОН в источнике W3(OH). Каждая базовая линия показывает ожидаемое положение пространственного мазерного компонента. Пересечение дает точную оценку координат. Очевидно, что пятно, соответствующее каналу 1108 (спектральная деталь Rd), незначительно смещено к северо-западу относительно центра наведения. По осям Y и X отложены ΔDEC и ΔRA, соответственно, относительно фазового центра.



Рис. 8: Прямые, соответствующие решению уравнения частоты интерференции, полученного по нескольким сканам, в 1132-ом спектральном канале (спектральная деталь Le) в левой круговой поляризации – мазер OH в источнике W3(OH). Пространственный компонент смещен к юго-западу относительно центра наведения.



Рис. 9: Прямые, соответствующие решению уравнения частоты интерференции, полученного по нескольким сканам, в 1136-ом спектральном канале (спектральная деталь Ld)в левой круговой поляризации – мазер OH в источнике W3(OH). Пространственный компонент смещен от центра наведения к югозападу относительно центра наведения.



Рис. 10: Прямые, соответствующие решению уравнения частоты интерференции, полученного по нескольким сканам, в 1149-ом спектральном канале (спектральная деталь Rb) в правой круговой поляризации – мазер OH в источнике W3(OH). Пространственный компонент смещен к северо-западу относительно центра наведения .



Рис. 11: Прямые, соответствующие решению уравнения частоты интерференции, полученного по нескольким сканам, в 1171-ом спектральном канале (спектральная деталь La) в левой круговой поляризации – мазер ОН в источнике W3(OH). Пространственный компонент смещен к северо-западу относительно центра наведения. Прямая, непересекающаяся в общем центре, по-видимому, связана со случайным максимумом.



Рис. 12: Прямые, соответствующие решению уравнения частоты интерференции, полученного по нескольким сканам, в 1172-ом спектральном канале (спектральная деталь La) в правой круговой поляризации – мазер OH в источнике W3(OH). Пространственный компонент смещен к северо-западу относительно центра наведения.



Рис. 13: Карта мазерных пятен источника W3(OH) на частоте 1665 МГц. По оси X и Y отложены сдвиги координат мазерных пятен относительно фазового центра, по прямому восхождению и склонению, соответственно. Черные кружки обозначают излучение в правой круговой поляризации, белые — в левой круговой поляризации (данные эксперимента 2–3 февраля 2011 г.). Черные и белые треугольники – данные в правой и левой круговой поляризации из работы [7]. Точка с координатами (0,0) сответствует точке с абсолютными координатами $RA \ 02^h 27^m 03^s.825$ и $DEC \ 61^\circ 52' 24''.653$, J2000.



Рис. 14: Рисунок, отображающий значения проекций баз наземнокосмического интерферометра во время эксперимента 31 января 2012 г. в Мега-длинах волн. По оси X отложены проекции баз в Мега-длинах волн. По оси Y - некалиброванный поток на базе. Для космических баз ~ 260 Мега-длин-волн - уровень сигнала не превышает уровня шумов.

Имя	Скорость	ΔRA	ΔDec	Имя	Скорость	ΔRA	ΔDec
детали	детали			детали	детали		
RCP	км/с	mas	mas	LCP	км/с	mas	mas
Ra	-47.49	-100	0	La	-47.57	80	30
		-80	70			0	-40
		-80	-40			0	30
						-80	30
						0	70
Rb	-45.02	-920	110	$^{\rm Lb}$	-46.34	-1230	-40
		-1000	110			-1230	-120
		-1000	190			-1150	-40
		-1000	120			-310	-350
		-1080	120			-1070	-40
						-920	30
						-840	30
Rc	-44.23	-310	-1110	\mathbf{Lc}	-45.55	-580	-1580
		-310	-1190			-1000	110
		-800	-810			-730	-1730
						-880	-1730
						150	110
						80	110
						-500	-1650
						-580	-1730
						-580	-1800
Rd	-41.77	0	30	Ld	-44.67	-580	-1420
		Ő	-40			-500	-1500
Re	-41.24	110	70	Le	-44.14	-90	-1650
		80	70			90	-1500
		80	30			50	-1500
		-50	-1880			120	-1580
		80	120				1000

Таблица 1: Параметры мазерных пятен, обнаруженных в источнике W3(OH) методом анализа частоты интерференции.

Подписано в печать 29.08.2012 г. <u>Формат 60х84/16. Заказ №54. Тираж 140 экз. П.л 2.</u> Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика 119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640