

## РСДБ — окно во Вселенную

© Л. И. Матвеевко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье описаны достигнутые успехи в прикладных направлениях и астрофизике, в частности рассмотрен метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), отражены его история и пути реализации.

По данным РСДБ в континууме и мазерном излучении получены изображения и кинематика активных ядер галактик и областей звездообразования, а также установлена их вихревая природа. Отмечено, что предельное угловое разрешение РСДБ достигает микросекунд дуги. Приведены примеры использования метода РСДБ для решения задач прецизионной космической навигации.

**Ключевые слова:** радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, астронавигация, космическая геодезия, квазары, формирование звезд, ядра галактик.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.48.85-91>

### Введение

Получаемая астрономическими методами информация очень многообразна и определяется в первую очередь угловым разрешением используемого инструмента. В этом смысле, казалось, радиоволны не являются наилучшим источником информации. Однако развитие техники в радиодиапазоне позволило не просто достичь углового разрешения оптических телескопов, а существенно его превзойти. Угловое разрешение метода РСДБ, предложенного в России, достигло микросекунд дуги и может быть существенно улучшено современными методами анализа принимаемого излучения. Все это позволило изучать структуру и кинематику компактных ядер галактик и областей формирования звезд. Кроме того, РСДБ — принципиально новая основа астронавигации, фундамент ряда традиционных направлений, таких как прецизионная астрометрия и геодезия. История создания и развития РСДБ тесно связана с освоением космического пространства.

### Астронавигация

В конце 50-х годов стартовали первые космические ракеты — «Лунники». Для успешного осуществления советской космической программы было необходимо контролировать траекторию их движения и определять точки прилунения аппаратных контейнеров. По указанию директивных органов радиоастрономы Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) на основе радиотелескопов Крымской радиоастроно-

мической станции в Качивели создали радиоинтерферометр [1], в качестве исторической справки блок-схема которого представлена на рис. 1. Работа прошла успешно и получила высокую оценку М. В. Келдыша и С. П. Королева.

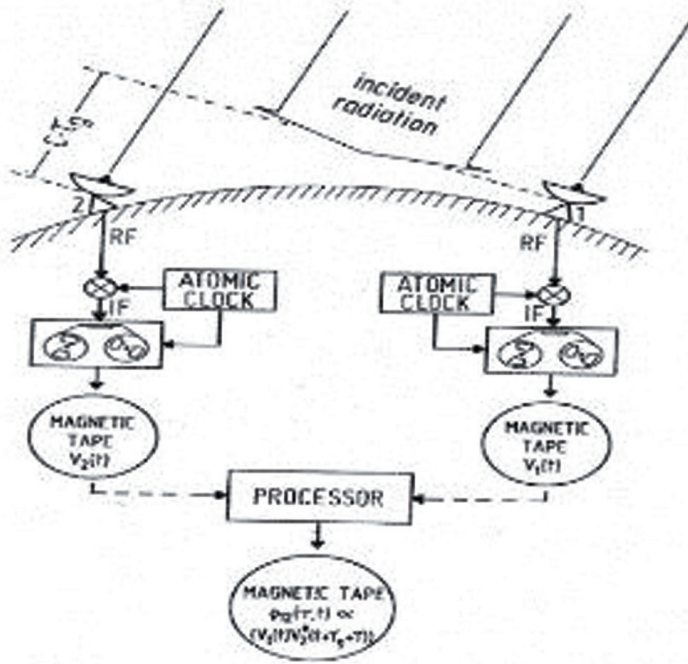


Рис. 1. Блок-схема технической реализации первых РСДБ-комплексов 60-х годов 20-го века

Следующий этап развития РСДБ в России — создание Центра дальней космической связи вблизи Евпатории. Основой измерительного комплекса центра был радиоинтерферометр, в разработке которого принимали активное участие радиоастрономы ФИАН [2]. Создание больших антенн сопровождалось разработкой методов измерения их параметров по источникам космического радиоизлучения и выбором компактных реперных источников для юстировки.

Блестящей иллюстрацией применения метода РСДБ были траекторные измерения в проекте ВЕГА. На основе 6 антенн, включая введенные в действие РТ-70 в Уссурийске и Евпатории и РТ-64 (Медвежьи озера), была создана отечественная РСДБ-сеть. Точность измерения положения баллонов, плавающих в атмосфере Венеры, достигла 300 м при расстоянии до Венеры 108 км и длине волны излучения передатчика 18 см [3]. Точность измерений совместно с глобальной РСДБ-сетью повысилась до 100 м [4].

В настоящее время РСДБ-наблюдения в России проводятся на базе радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» [5] — постоянно действующей национальной радиоинтерферометрической сети. В состав комплекса входят три радиоастрономические обсерватории: «Светлое» (Ленинградская область), «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесия) и «Бадары» (Республика Бурятия), оборудованные тремя радиотелескопами РТ-32 и таким же количе-

ством радиотелескопов РТ-13. Основная цель создания комплекса «Квазар-КВО» — проведение высокоточных наблюдений для фундаментального координатно-временного обеспечения России.

Дальнейшее развитие РСДБ для решения задач прецизионной космической навигации связано с повышением чувствительности, т. е. с увеличением диаметра антенн используемых в РСДБ радиотелескопов. В нашей стране, обладающей двумя уникальными антеннами (70-метровой и 64-метровой), главной проблемой является обеспечение их сохранения: их модернизации и эксплуатации высококвалифицированными кадрами. Для решения данной задачи целесообразно было бы передать все финансирование работ по РСДБ-тематике одной организации. Распределение времени на уникальных системах должно проводиться по заявкам независимым программным комитетом.



Рис. 2. Радиотелескоп РТ-70

## Астрофизические исследования

### *Источники мазерного излучения*

Исследования в спектральных линиях позволяют получить трехмерную пространственную структуру объекта. Использование метода РСДБ дает максимально возможное угловое разрешение объектов. Отклик радиоинтерферометра соответствует амплитудно-фазовым данным изображения в комплексном виде. В этом случае угловое разрешение определяется точностью определения фазы сигнала, отношением сигнал — шум. В случае вспышки мощного мазерного излучения в линиях водяного пара в Орионе КЛ достигнуто угловое разрешение в микросекунды дуги. Это относится и к ярким компактным источникам непрерывного излучения — джетом. Микросекундные разрешения достигнуты и в проекте *ALMA (Atacama Large Millimeter-submillimeter Array* — Атакамская большая миллиметровая-субмиллиметровая решетка) в миллиметровом диапазоне длин волн. Ниже рассмотрены результаты исследований сверхтонкой структуры астрономических объектов, в том числе с использованием РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

#### Орион КЛ

В тонкой структуре плотного молекулярного облака Орион КЛ выделены двухзаходная спираль, наблюдаемая с ребра, и биполярный выброс, окруженный низкоскоростной составляющей. Высокая коллимация выбросов определяется вращением объекта. Скорость потоков растет по мере удаления от центра объекта. Вращение спиральной структуры, твердотельное с периодом 170 лет, определяется эжекцией избыточного углового момента поступающего вещества [6–8].

#### NGC 4258

Высокая яркость компонент галактики в мазерном излучении позволила реализовать разрешение до микросекунд дуги. Вытянутая структура с яркими компактными фрагментами соответствует двухзаходной спирали, наблюдаемой с ребра, с твердотельным характером вращения. В центральной части наблюдается истечение вещества в виде тонких волокон [9].

### *Структура в линиях гидроксила, длина волны 18 см*

#### W3 OH

Исследования на этой длине волны ограничены влиянием рассеяния на неоднородностях межзвездной среды. Однако объект *W3 OH*, расположенный в рукаве Галактики, наблюдается поперек рукава, что незначительно ограничивает его разрешение [10]. С помощью комплекса «Квазар-КВО» получены радиокарты в правой и левой поляризациях. Установлено расщепление линий в отдельных компонентах, достигающее 10.6 кГц, что соответствует магнитному полю с  $H = 7.6$  мГс. Структура близлежащей области, наблюдаемая с ребра, включает три компонента, скорости которых соответствуют твердотельному вращению.

## *Активные ядра Галактик в континууме*

### Квazar 3C273

Структура квазара включает компактное ядро и односторонний джет. Исследования сверхтонкой структуры на длинах волн 2 и 3 см с разрешением 50 и 100  $\mu\text{as}$  выделили контрджет и параллельные цепочки компонент, соответствующие тангенциальным направлениям кольцевых токов, возбуждаемых во вращающихся потоках [9].

### 3C 345

Квazar, в тонкой структуре которого на длине волны 7 мм при разрешении 20  $\mu\text{as}$  выделяются джет и биполярный поток, окруженный низкоскоростной составляющей, параллельными цепочками компонент, соответствующих тангенциальным направлениям кольцевых токов [11].

### Virgo A

В структуре активной области на длинах волн 2 и 3 см с разрешением 50  $\mu\text{as}$  наблюдаются яркий компактный источник — эжектор и спиральная структура центрального биполярного потока. Окружающая низкоскоростная составляющая имеет вид раструба. Низкоскоростные потоки — цепочки компонент — соответствуют тангенциальным направлениям кольцевых токов, определяющих магнитное поле типа соленоида [10].

### Cyg A

Отличительной особенностью данного объекта является двусторонний джет, что атипично. Исследования тонкой структуры установили причину — два центра активности, разнесенные на 1.2 mas друг относительно друга [12].

### OJ 287

В отличие от наблюдаемых двух центров активности в Cyg A, в этом случае мы видим процесс формирования второго центра. Повышенное поступление вещества по северному рукаву приводит к образованию независимого центра активности с джетом в западном направлении. Ориентация поляризации излучения перпендикулярна направлению потока [13].

### Сейфертовская галактика NGC 1275 (3C 84)

Природа объекта до конца неясна, возможно, это сталкивающиеся галактики. Раздвоение спектральных линий предполагает относительную скорость фрагментов  $\sim 600$  км/с. Исследования тонкой структуры объекта на длинах волн 7 мм и 2 см выявили три активные зоны. Движение вещества происходит в северную зону по двум рукавам и эжектируется в южном направлении. Кинетическая энергия поступающего потока высока, и поток начинает эжектироваться с расстояния 0.15 mas до центра. До центра галактики доходит незначительная часть вещества. На расстоянии 1.5 mas формируется вторая активная зона с эжекцией коаксиального потока в западном направлении. На расстоянии 0.8 mas формируется третья активная зона — вихрь [12].

## **Заключение**

Высокая чувствительность системы РСДБ позволила получить изображения ядер и исследовать тонкую (20  $\mu\text{as}$ ) и сверхтонкую микросекундную структуры областей звездообразования и ядер галактик. Структура и кинематика исследуемых объектов самосогласованы и имеют вихревую природу:



- окружающее вещество по двум рукавам поступает к центру;
- вещество с избыточным угловым моментом уносится биполярным потоком, определяющим твердотельное вращение;
- остаток вещества выпадает на формирующееся центральное тело;
- коллимация и ускорение потоков определяются их вращением;
- вращение потоков возбуждает кольцевые токи — магнитное поле;
- в объектах *Cyg A* и *3C 84* наблюдаются несколько активных зон — вихрей.

Дальнейшее развитие РСДБ связано с повышением чувствительности. Радиотелескоп РТ-70 в Индии позволяет объединить крупнейшие инструменты мира в одну сеть, чувствительность которой повысится на порядок по сравнению с существующими РСДБ-сетями. Это важно и для решения задач прецизионной космической навигации.

России, обладающей двумя уникальными антеннами (70 и 64 м), под силу решать аналогичные задачи. Главной проблемой является финансирование и модернизация уникальных российских радиотелескопов, а также обеспечение их эксплуатации высококвалифицированными кадрами ученых — радиоастрономов в рамках единого научного центра. Распределение наблюдательного времени на этих уникальных системах должно проводиться по заявкам независимым программным комитетом с учетом выделенного финансирования.

## Л и т е р а т у р а

1. *Матвеев Л. И.* История РСДБ — становление и развитие // Сообщение ИПА РАН. — 2007. — № 176.
2. *Matveyenko L. I.* Early VLBI in the USSR // *Astron. Nachr.* — 2007. — no. 328(5). — P. 411–419.
3. *Матвеев Л. И. и др.* Сверхдальняя радиоинтерферометрическая сеть на волне 18 см // Письма в Астрон. журн. — 1986. — Т. 12, № 1. — С. 59–65.
4. *Sagdeev R. Z. et. al.* // *A&A.* — 1992. — Vol. 254, no. 1/2. — P. 387–392.
5. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Pyin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshkin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V.* Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // *Geodesy and Geodynamics.* — 2019. — Vol. 10, no. 2. — P. 150–156.
6. *Матвеев Л. И., Демичев В. А., Сиваконь С. С.* Кинематика структуры активной области Ориона КЛ // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2017. — Т. 43, № 6 — С. 444–459.
7. *Матвеев Л. И., Демичев В. А., Ипатов А. В., Мельников А. Е., Суркис И. Ф.* Поляризация мазерного излучения H<sub>2</sub>O источника Орион КЛ в эпоху 2011.7 // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2012. — Т. 38, № 9. — С. 645–651.
8. *Матвеев Л. И., Демичев В. А., Ипатов А. В., Мельников А. Е., Суркис И. Ф.* Активная область звездообразования в Орионе КЛ, эпоха 2012 // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2012. — Т. 38, № 12. — С. 853–859.
9. *Матвеев Л. И., Демичев В. А.* Структура балджа галактики NGC4258 // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2017. — Т. 43, N 9. — С. 633–642.
10. *Матвеев Л. И., Ипатов А. В., Демичев В. А., Мельников А. Е.* Структура объекта W3 OH в мазерных линиях гидроксила // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2014. — Т. 40, № 2. — С. 115–130.
11. *Матвеев Л. И., Сиваконь С. С.* Кинематика активной области квазара 3C 345 // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2013. — Т. 39, № 8. — С. 547–579.
12. *Матвеев Л. И., Селезнев С. В.* Тонкая структура джета Лебеда А // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2015. — Т. 41, № 12. — С. 803–807.
13. *Матвеев Л. И., Сиваконь С. С.* Тонкая структура ядра блазара OJ 287. II. Длина волны 2 см // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2018. — Т. 44, № 7. — С. 421–441.

# VLBI – a Window into the Universe

L. I. Matveenko

The method of very long baseline interferometry (VLBI), its history, ways of its realization, achievements in applied fields and astrophysics are considered. It is noted that the high angular resolution of VLBI reaches microseconds of the arc. According to the VLBI data in the continuum and maser radiation, images and kinematics of the active nuclei of galaxies and star formation regions were obtained, their vortex nature was established. Examples of using the VLBI method for solving problems of precision space navigation are given.

**Keywords:** very long baseline interferometry, space navigation, space geodesy, quasars, star formation, galactic nuclei.