

«Квazar-КВО» и QVN как объединенная РСДБ-сеть

© М. Чжан^{1,2}

¹Синьцзянская астрономическая обсерватория, г. Урумчи, КНР

²Главная лаборатория радиоастрономии, Китайская академия наук, г. Пекин, КНР

Реферат

К настоящему моменту в России создана и действует РСДБ-сеть «Квazar-КВО». Она имеет базовые линии протяженностью более 4000 км, объединяющие Европу и Азию, что при работе с QVN (QiTai Telescope (QTT)-coordinated VLBI network) позволит достичь очень высоких разрешений. Авторы статьи предлагают сотрудничество и проведение совместной работы между российскими и китайскими интерферометрическими сетями с целью полного использования возможностей объединенной РСДБ-сети.

Изучение текущего состояния РСДБ-сетей в мире показало, что в центре Евразии еще не достаточно интерферометрических сетей в диапазоне коротких сантиметровых длин волн с километровыми базами. Разрабатываются планы по расширению РСДБ-сети на территории западного Китая, что согласуется со стремлением российских специалистов расширить сеть «Квazar-КВО» на восток. Обе стороны постепенно наращивают свои возможности для проведения совместных наблюдений на более длинных базах. Авторы также поддерживают идею сотрудничества между соответствующими институтами России и Китая с целью обеспечения совместимости в работе систем преобразования сигналов и корреляторов обеих сетей для проведения совместных наблюдений. Специализированное оборудование для наблюдений в режиме одиночного телескопа также может использоваться совместно.

Страны должны использовать преимущества обеих сетей для дальнейшего проведения совместных исследований методом РСДБ. Объединенная сеть на основе «Квazar-КВО» и сети CVN может быть потенциально эквивалентной существующим европейским и американским РСДБ-сетям.

Ключевые слова: методики, интерферометрия, телескопы, астрометрия, гравитационные волны.

Контакты для связи: Чжан Мин (ming.zhang@xao.ac.cn).

Статья поступила в редакцию 20.01.2020, принята к публикации 20.02.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Чжан М. «Квazar-КВО» и QVN как объединенная РСДБ-сеть // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. Р. 74–79.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.53.74-79>

Array Networking between Quasar and QVN

M. Zhang^{1,2}

¹Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, China

²Key Laboratory for Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Abstract

The Quasar very long baseline interferometry network in Russia is now at its fully operational stage. With its baselines spanning four thousands kilometers over Asia and Europe, it can bring a great synergy to the existing compact interferometry networks to achieve very high resolutions. So we propose a close coordination between the Russian and the Chinese interferometric arrays to fully utilize the power of the two networks.

We looked into the current status of radio telescope arrays in the world and found that the interferometry nodes of kilometer baselines in the short-centimeter wavelength range are still scarce in the center of Eurasia. The Chinese very long baseline interferometry network (CVN) is planning to add more nodes in western China, which is in line with the trend of Russia's Quasar network expansion to the east. The two networks are gradually sharing more commonly-visible sky for longer-track of joint observations. We also initiated collaboration between relevant institutes in Russia and China to ensure compatible digital back-ends and correlators in both networks capable to process our joint observations. Specialized single-dish observation facilities can also be shared through our networks.

We should utilize the strengths of both networks to form a joint force for promoting astronomical researches with radio interferometry. The network, which will join Quasar and CVN is potentially equivalent to the existing centimeter-wavelength very long baseline interferometry networks in Europe and America.

Keywords: techniques, interferometric, telescopes, astrometry, gravitational waves.

Contacts: Ming Zhang (ming.zhang@xao.ac.cn).

Received January 20, 2020, accepted February 20, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Zhang M. Array Networking between Quasar and QVN // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 74–79.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.53.74-79>

Введение

Радиотелескоп QiTai (QTT) Синьцзянской астрономической обсерватории (ХАО) [1] относится к новому поколению полноповоротных радиотелескопов. Чувствительность РСДБ-наблюдений на базах с QTT значительно возрастет. В настоящее время CVN (Chinese VLBI Network, китайская РСДБ-сеть) включает четыре основных пункта: Шанхай, Миунь, Куньмин и Урумчи. Существует план по развитию РСДБ-сети для будущих исследований дальнего космоса и радиоастрономических наблюдений путем создания еще более длинных баз и радиотелескопов большего диаметра. В Тибете и Северо-Восточном Китае были выбраны два потенциально возможных места для строительства таких телескопов. Средства глобальной системы РСДБ-наблюдений (VGOS, VLBI Global Observing System) [2] постепенно развиваются в Китае. В будущем быстроповоротные радиотелескопы с зеркалом небольшого диаметра и со сверхширокой полосой приема заменят традиционные радиотелескопы среднего размера в РСДБ-сетях для большей части наблюдений непрерывного спектра. Только в провинции Синьцзян уже было установлено несколько радиотелескопов для интерферометрических наблюдений, например, Наньшань 26 м и 13 м, Кашгар 13 м, Шахе 35 м и новый телескоп QTT 110 м. Также есть возможность построить еще один миллиметровый или VGOS радиотелескоп на юго-западном плато в Синьцзяне. Таким образом, в Синьцзяне может быть сформирована региональная интерферометрическая сеть с короткими и средними базами. Здесь и далее она будет называться QVN – QTT-coordinated VLBI Network. Современная российская РСДБ-сеть «Квазар-КВО» начала действовать в начале 2000-х годов как адаптированная версия проекта советской РСДБ-сети. Для геодезических наблюдений в последнее время станции РСДБ-сети «Квазар-КВО» были оборудованы новыми VGOS радиотелескопами, что позволило использовать радиотелескопы RT-32 для астрофизических исследований. Авторы статьи предлагают создание объединенной сети CVN и «Квазар-КВО» для РСДБ-наблюдений с высоким разрешением и рассматривают ее потенциальные возможности для использования в астрофизических исследованиях.

Средства и методы

Конфигурации интерферометрических сетей

Радиоастрономические антенные решетки строятся для решения различных научных задач. Обычно решетки с короткими базами обладают низким разрешением и работают на низких частотах. В то время как решетки с длинными базами обладают высоким разрешением и работают на более высоких частотах. Типичные антенные решетки с низким разрешением: длинноволновая

антенная решетка (LWA, Long-Wavelength Array) в США, низкочастотная решетка (LOFAR, LOw Frequency ARray) в Европе, широкополосная решетка Меркисона (MWA, Murchison Widefield Array) в Австралии и километровая решетка (SKA, Square Kilometre Arrays) в Австралии и Южной Африке. Они предназначены в первую очередь для исследований эпохи реионизации, барионных акустических осцилляций и сигналов пульсаров. К решеткам высокого разрешения, таким как РСДБ-сети сантиметрового диапазона, относятся Большая атакамская миллиметровая решётка (ALMA, Atacama Large Millimeter Array) и телескоп горизонта событий (ЕНТ, Event Horizon Telescope). Такие решетки обладают сверхдлинными (глобальными) базами или сверхвысокими частотами приема для наблюдений тонкой структуры джетов, областей звездообразования, черных дыр и аккреционных дисков. Однако между этими двумя типами решеток строгого различия нет. Многие решетки оснащены приемниками с разными диапазонами приема. Например, сверхдлиннобазовая решетка VLBA (Very Long Baseline Array) с приемниками в 3-миллиметровом диапазоне может формировать глобальную миллиметровую РСДБ-сеть (GMVA, Global mm-VLBI Array) с другими антеннами, оснащенными приемниками миллиметровых длин волн. ЕНТ состоит из различных антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. В антенной решетке длинные базы чувствительны к точечным объектам и отвечают за высокое пространственное разрешение, а короткие базы чувствительны к протяженным структурам и отвечают за низкое пространственное разрешение. Однако длинные базы формируют узкую синтезированную диаграмму направленности (луч), поэтому яркость компактного радиоисточника должна быть достаточной для его обнаружения. Короткие же базы формируют синтезированный луч большого углового размера, что подходит для обнаружения протяженных объектов с низкой яркостью и проведения быстрых обзорных наблюдений. РСДБ-сети состоят из ограниченного количества баз (разреженная решетка), что приводит к ограничению по полю зрения. Компактные решетки обычно состоят из часто расположенных небольших антенн с широкими диаграммами направленности, формируя многочисленные базы, что обеспечивает широкое поле зрения. Используя технологию управления лучом диаграммы направленности, с помощью аппаратного управления фазой, компактные решетки могут формировать один или несколько лучей для наблюдения одного или нескольких объектов одновременно. В идеале, если нет больших пропусков в длинах баз, интерферометрическая решетка будет приближаться к непрерывному заполнению апертуры,

однако дискретность антенных элементов приводит к появлению неоднородных боковых лепестков в области пространственных частот. Это затрудняет обратную свертку сигналов и приводит к потере чувствительности при построении изображений радиоисточников. Современный метод заполнения пробелов в uv -плоскости — это сверхширокополосная регистрация сигнала, поскольку ширина треков на uv -плоскости прямо пропорциональна ширине полосы регистрации. Примером применения такой технологии является обновленная многоэлементная связанная радиоинтерферометрическая сеть (MERLIN) в Великобритании — e-MERLIN. При использовании непрерывной полосы регистрации 2 ГГц, по сравнению со старой узкополосной системой, заполнение uv -плоскости сетью e-MERLIN практически сплошное. Таким образом, современная тенденция развития РСДБ-решеток сводится к увеличению количества антенн в сети для получения плотного заполнения uv -плоскости и к снижению диаметра зеркала антенны для обеспечения широкого поля зрения, тогда как достаточное разрешение обеспечивается разнообразием длин баз между элементами сети. Обычно это центрально ориентированные решетки с минимально достаточным распределением элементов, чтобы получить такую форму синтезированного луча, которая могла бы обеспечить од-

новременно высокую чувствительность на внутренних базах и высокое разрешение с внешними базами, как, например, SKA, ALMA и очень большая решетка нового поколения (ngVLA).

На рис. 1 приведено географическое распределение современных антенных решеток и РСДБ-сетей, включая отдельные большие радиотелескопы. Видно, что все традиционные РСДБ-сети и большие радиотелескопы расположены в северном полушарии, не только потому что ведущие страны находятся в северном полушарии, но и потому что там расположена большая часть материков. Современные большие решетки, такие как ALMA и SKA, были размещены в южном полушарии из-за превосходного астроклимата. Однако очевидно, что долготное разнесение радиотелескопов в южном полушарии недостаточно из-за недостатка суши. Долготное разнесение антенн важно не только для формирования баз в направлении восток — запад в зоне взаимной видимости, но и для организации глобальных непрерывных наблюдений разных решеток в разных часовых поясах. В настоящее время на евразийском континенте все еще существует большой разрыв в размещении РСДБ-сетей от Центральной Азии до Восточной Европы, в то время как работа сетей QVN и «Квазар-КВО» [3] могла быть скоординирована.

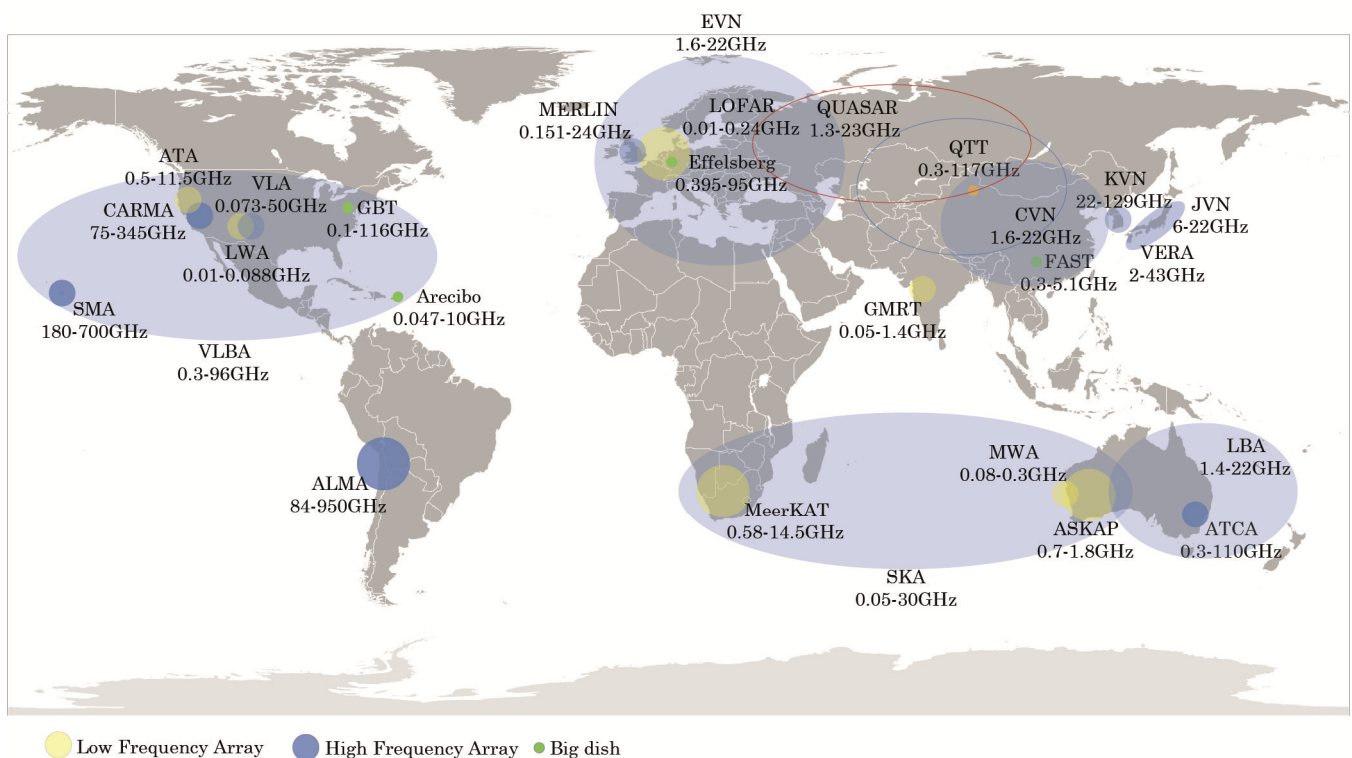


Рис. 1. География размещения антенных решеток

Спецификации современных компактных решеток и РСДБ-сетей

Название	Местоположение	Диаметр и количество антенн	Максимальная длина базы, км	Диапазон рабочих частот, ГГц	Диаграмма направленности, мс дуги/ГГц
VLBA	США	25 m × 10	8600	0.3–86	0.17/43
EVN	Европа	14–100 m × ~10	3000–10000	1.6–22	0.3/22
CVN	Китай	25, 26, 40, 50, 65 m	3200	1.6–22	0.9/22
VERA	Япония	20 m × 4	2300	6.7–43	0.63/43
LBA	Австралия	22–70 m × ~10	1700	1.4–22	1.7/22
LOFAR	Нидерланды/Европа	30–65 m × ~30	1500	0.01–0.24	170/0.24
QVN	Китай	13×n–26, 110 m	1000	2–14	4.5/14
e-MERLIN	Великобритания	25 × 4–32, 38, 76 m	217	1.3–22	40/43
VLA	США	25 m × 27	36	0.07–50	40/43
ALMA	Чили	12 m × 54 + 7 m × 12	16	43–900	4.5/850
SKA	Саудовская Аравия/Австралия	~1 km ²	~3000	0.1–22	0.7/22

Покрывание uv -плоскости объединенной сети

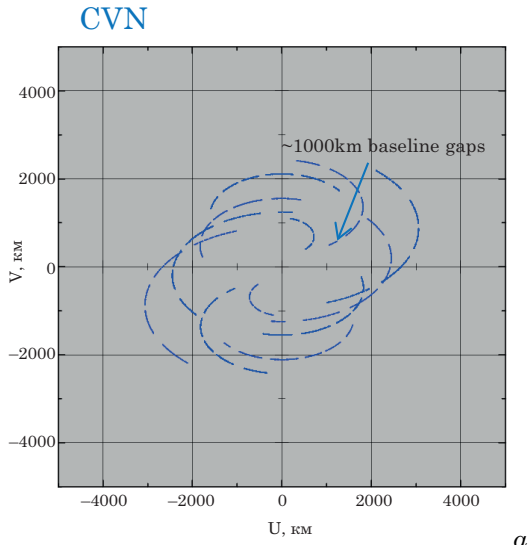
В таблице перечислены характеристики современных РСДБ-сетей и компактных решеток. Длины баз большинства РСДБ-сетей превышают несколько тысяч километров, в то время как длины баз большинства компактных решеток составляют менее двух сотен километров. Отсутствие баз длиной до тысячи километров влечет за собой появление пустот в заполнении uv -плоскости для РСДБ-сетей, где это критически важно для формирования синтезированного луча. Синтезированный луч, полученный по недостаточно заполненной uv -плоскости, внесет ошибки интерполяции в восстановленное изображение на этапе обратной свертки. Среди РСДБ-сетей, EVN, VLBA и LBA способны формировать базы длиной менее тысячи километров, хоть и не совсем оптимальные, тогда как в сетях CVN и «Квазар-КВО» базы такого порядка отсутствуют в принципе.

Сеть QVN в Синьцзяне может сыграть важную роль в заполнении пробелов в uv -плоскости, образованной сетью CVN. Провинция Синьцзян является прекрасным местом для размещения новых радиотелескопов. Его удаленность от промышленных районов и наличие горных плато могут обеспечить защиту от радиочастотных помех (RFI). Существуют планы по созданию новых радиотелескопов в Синьцзяне, которые совместно с уже присутствующими в регионе антеннами улучшат конфигурацию сети QVN. Длины баз сети ожидаются преимущественно в диапазоне 600–1000 км, т. к. вокруг бассейна Тарима расположены горные хребты. На сегодняшний день сеть QVN в составе радиотелескопов Урумчи, Кашгар, Шахе, Цитай и перспективной обсерваторией в Хотане уже обеспечивают прекрасное заполнение uv -плоскости с сетью CVN, как показано на рис. 2. Поскольку сеть «Квазар-КВО» в настоящее время состоит

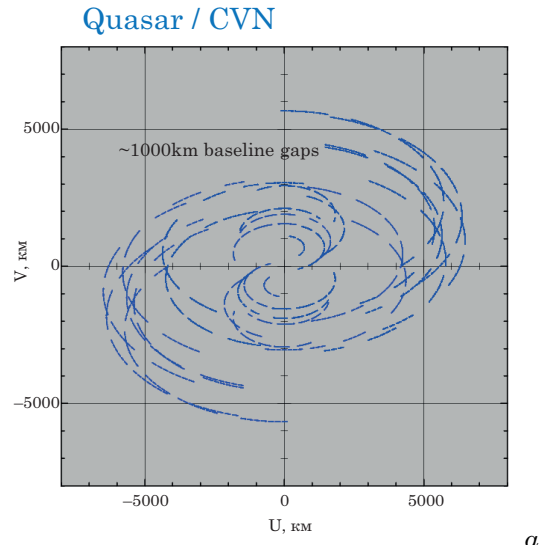
только из трех пунктов на расстоянии более 4000 км, наличие более коротких баз является ключом для получения высококачественных изображений радиоисточников. Объединив РСДБ-сети «Квазар-КВО» и CVN с участием QVN, можно получить идеальное заполнение uv -плоскости, которое уже сопоставимо или даже лучше, чем у EVN (рис. 3). Подобное координированное взаимодействие РСДБ-сетей «Квазар-КВО» и CVN / QVN может само по себе сыграть важную роль в будущих РСДБ-наблюдениях, в том числе при оперативных наблюдениях редких событий, например, проявления гравитационно-волнового всплеска GW170817 [4] в радиодиапазоне.

Наблюдения в режиме одиночного радиотелескопа

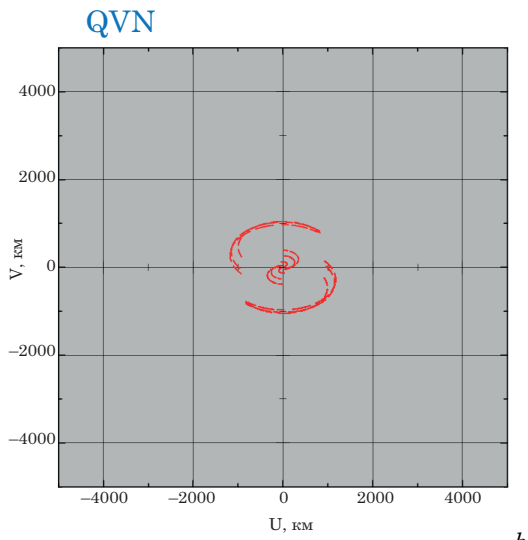
На данный момент сети «Квазар-КВО» и QVN имеют собственные команды инженеров для разработки радиоастрономической аппаратуры. В Институте прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) разработаны специализированный программный коррелятор RASFX и многофункциональная система преобразования сигналов MDBE (Multifunctional Digital Back End), которые предназначены специально для астрометрических наблюдений на РСДБ-комплексе «Квазар-КВО». Обсерватория ХАО выделяется разработками для наблюдений в режиме одиночной антенны, в частности оборудованием для наблюдения пульсаров и спектрометрии молекулярных линий, а также специализированной системой регистрации на основе ROACH board [5] для наблюдений быстрых радиовсплесков, которая в будущем заменит старую систему регистрации (DFB, Digital Filter Bank) для наблюдений пульсаров. Опыт разработки высокочастотных приемников в ХАО может быть полезен в будущем при



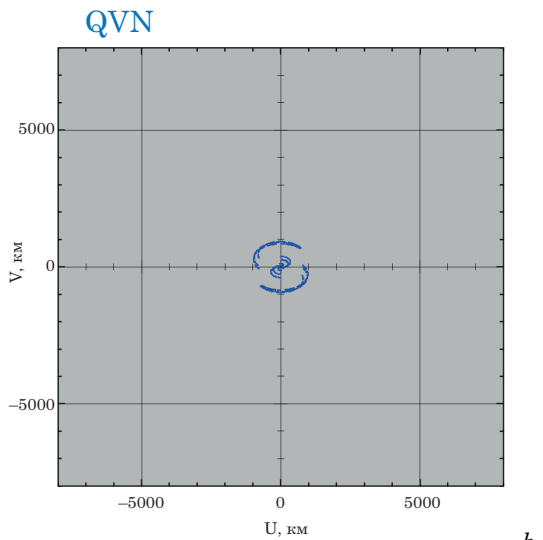
a



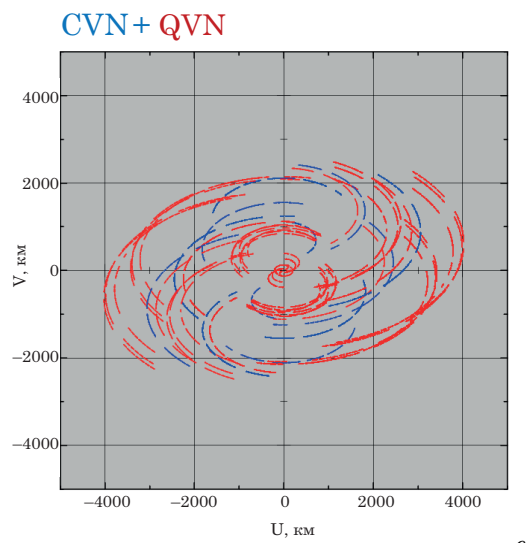
a



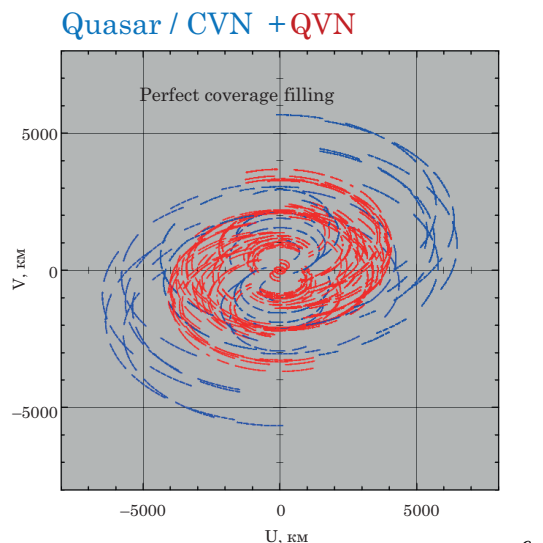
b



b



c



c

Рис. 2. Пример покрытия uv -плоскости при совместных наблюдениях сетей QVN и CVN (объект B0218+357)

Рис. 3. Пример покрытия uv -плоскости при совместных наблюдениях сетей QVN и «Квазар-КВО» (объект B0218+357)

обновлении высокочастотных приемников на антеннах комплекса «Квазар-КВО». РСДБ-сеть естественным образом обеспечивает нужную совместимость для проведения совместных наблюдений. Система управления радиотелескопом Field System (FS) и цифровые системы преобразования сигналов DBBC или RDDE бесперебойно работают на множестве антенн. Универсальная система записи также была тщательно протестирована с различными системами преобразования сигналов, например, DBBC, RDDE и китайской системой сбора данных (CDAS). Таким образом, в случае с РСДБ-сетями QVN и «Квазар-КВО» нет никаких препятствий для проведения совместных РСДБ-наблюдений. Что касается наблюдений в режиме одиночного радиотелескопа, РСДБ-комплекс «Квазар-КВО» многократно испытан в радиолокационных астрономических наблюдениях, в то время как сотрудники ХАО имеют десятилетний опыт наблюдений пульсаров, внутрисуточной переменности квазаров и спектральных наблюдений молекулярных линий. При оснащении соответствующей цифровой системой регистрации, 32-метровые антенны РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» смогут проводить наблюдения в режиме одиночного телескопа: например, обнаружение быстрых радиовсплесков, в дополнение к телескопам ХАО. Следовательно, в результате готовности как программного, так и аппаратного обеспечения, взаимодействие между сетями «Квазар-КВО» и QVN может выйти далеко за пределы создания еще одной большой РСДБ-сети, эта сеть может стать альтернативой сетей VLBA и EVN в восточном полушарии. Отдельные одиночные антенны также могут быть использованы для непрерывных наблюдений в разных научных программах на различных частотах в разных часовых поясах.

Заключение

РСДБ-комплекс «Квазар-КВО» и сеть CVN — две РСДБ-сети, которые дополняют друг друга. Их взаимодействие должно быть апробировано в рамках будущих совместных астрофизических наблюдений. Объединенная РСДБ-сеть конкурирует в северном полушарии с сетями EVN и VLBA в сантиметровом диапазоне длин волн и угловым разрешением менее миллисекунды дуги.

Поддержка

Работа поддержана Национальным научным фондом Китая (11773062) и Программой «Свет Западного Китая» Китайской академии наук (2017-XBQNXZ-A-008).

Литература

1. Wang N. Xinjiang Qitai 110m radio telescope // SCIENTIA SINICA: Physica, Mechanica & Astronomica. 2014. Vol. 44, no. 8. P. 783–794.
2. Petrachenko W., Behrend D., Hase H., et al. The VLBI2010 Global Observing System (VGOS) // EGU General Assembly Conference. 2013. Vol. 15. P. 12867.
3. Ipatov A., Smolentsev S., Salnikov A., et al. The state-of-the-art of Russian VLBI network // 21st Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. 2013. P. 155–158.
4. Ghirlanda G., Salafia O. S., Paragi Z., et al. Compact radio emission indicates a structured jet was produced by a binary neutron star merger // Science. 2019. Vol. 363, no. 6430. P. 968–971.
5. CASPER, Roach2 & Snap2. Collaboration for astronomy signal processing and electronics research. 2009. URL: <https://casper.berkeley.edu/wiki/SNAP2> (accessed 07.08.2020).