

Радиоинтерферометрические исследования угловой структуры космических радиоисточников в декаметровом диапазоне волн, выполненные в Украине

А. В. Мень

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: @rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2005 г.

Статья посвящена созданию в Украине системы декаметровых радиоинтерферометров УРАН с предельным угловым разрешением около одной секунды дуги. Приводятся основные характеристики этих инструментов, а также оригинальные методики измерений и обработки экспериментальных данных для определения наиболее вероятных моделей распределения радиояркости космических радиоисточников в декаметровом диапазоне волн. Результаты проведенных измерений иллюстрируются типичными примерами наблюдений радиогалактики 3С234 и квазара 3С254. Рассматриваются перспективы дальнейших исследований в этом направлении.

Введение

Радиоастрономия как экспериментальная наука начала развиваться после открытия в 1931 г. американским радиоинженером Карлом Янским в декаметровом диапазоне радиоволн распределенного излучения космического фона. Однако именно декаметровый диапазон – наиболее длинноволновый, в котором еще могут проводиться радиоастрономические наблюдения с помощью инструментов, расположенных на поверхности Земли, долгое время оставался “белым пятном” этой науки. В течение многих лет на декаметровых волнах проводились лишь эпизодические исследования, посвященные в основном одной программе – измерению спектральных плотностей радиоизлучения наиболее интенсивных космических источников. Однако в дальнейшем и эти наблюдения были фактически прекращены. Это объяснялось большой сложностью достаточно точных измерений в декаметровом диапазоне, связанной с его спецификой.

Во-первых, в этом диапазоне наблюдается очень большой уровень распределенного космического радиоизлучения, эффективная температура которого возрастает с удлинением радиоволны λ примерно пропорционально λ^3 . Во-вторых, радиоастрономическим измерениям мешают сигналы коротковолновых радиовещательных станций и различные промышленные помехи, уровень которых на несколько порядков превышает интенсивность космических радиосигналов. В-третьих, на наблюдения в этом диапазоне существенно влияет космическая плазма, сверхкорона Солнца и ионосфера Земли, поглощающая и рассеивающая декаметровые волны, вызывающая большие амплитудные и фазовые флуктуации радиоастрономических сигналов. Наконец, еще одна проблема была связана с отсутствием в то время у нас в стране и за рубежом необходимых для эффективных наблюдений антенных систем для декаметровых радиотелескопов. В наиболее освоенных радиоастрономией

диапазонах – миллиметровом, сантиметровом, дециметровом и коротковолновой части метрового диапазона – использовались различные антенные системы, разработанные ранее для радиолокации, радионавигации, радиорелейных линий и других практических применений. В этих антеннах для управления в пространстве остроуправленным лучом – ориентированием луча на наблюдаемый объект и сопровождением его во времени, использовались механические методы управления диаграммой направленности по одной или двум угловым координатам. Применялось всего несколько антенн с электрическим управлением лучом по одной угловой координате (склонению) чисто фазовым способом с помощью дискретно переключаемых фазовращателей $0 \div \pi$, что позволяло проводить наблюдения фактически на одной настройке в очень узкой полосе частот. В декаметровом диапазоне, где размеры требуемых антенн могут составлять сотни и даже тысячи метров, при величине их эффективных площадей порядка $10^4 \div 10^5$ м² и более, механические методы управления лучом оказались совершенно неприемлемыми. Для радиоастрономических исследований в этом диапазоне требовались антенны совершенно другого типа, которые в технике радиосвязи, использующей этот же диапазон, не были известны.

Радиоастрономические исследования в Академии наук Украины вначале в Институте радиофизики и электроники, впоследствии в Радиоастрономическом институте были начаты с разработки для декаметровых радиотелескопов антенн нового типа, в которых использовались электрические методы управления лучом. К 1970 г. эта работа в основном была закончена. Был создан ряд небольших радиотелескопов, на которых были опробованы оптимальные принципы построения новых антенн, а также начаты первые радиоастрономические измерения спектральных плотностей излучения дискретных космических радиоисточников, а также радиоизлучения Солнца. Завершились эти исследования разработкой

и сооружением большого радиотелескопа УТР-2 (Украинского Т-образного радиотелескопа – 2 модель) с размерами 1840×900 м и площадью апертуры около 150000 м² на частоте 25 МГц при приеме в зенит, который до настоящего времени является наиболее эффективным декаметровым инструментом в мире [1].

Антенные системы всех декаметровых радиотелескопов АН Украины, включая УТР-2, представляли собой многорядные эквидистантные прямоугольные антенные решетки, расположенные параллельно земной поверхности. Они состояли из широкополосных симметричных горизонтальных вибраторов, установленных на вертикальных металлических мачтах с индивидуальными фундаментами на высоте 3.5 м от земли. Суммирование высокочастотных сигналов всех вибраторов и их фазирование для управления лучом проводилось по многоэтажной (“елочной”) схеме. С этой целью использовался временной способ, когда фазирование сигналов проводилось с помощью линий задержки сигналов во времени, что обеспечивало требуемую широкополосность антенн и независимость программ управления лучом от частоты измерений. Благодаря этому, разработанные радиотелескопы могли одновременно вести наблюдения на ряде частот декаметрового диапазона при ориентировке луча (лучей) в одном и том же заданном направлении в пространстве. Управление лучом проводилось дискретно, однако соседние положения луча были настолько близкими, что дискретность их перемещения практически не ощущалась при измерениях. В радиотелескопе УТР-2, например, было реализовано всего 2097152 положений луча (2048 – по склонению δ и 1024 – по прямому восхождению α) в секторе обзора не менее $\pm 4^{\text{h}}$ по α и от -20 до $+90^\circ$ – по δ . Максимальная разрешающая способность, обеспечиваемая УТР-2 на максимальной частоте 25 МГц при ориентировке луча в зенит, была 27 угловых минут. При этом система формирования диаграммы направленности УТР-2 была многолучевой и позволяла одновременно

вести наблюдения пятью лучами, разнесенными друг от друга по склонению на полуширину луча.

Декаметровые радиоинтерферометры УРАН

После сооружения радиотелескопа УТР-2, его настройки и юстировки были начаты не только относительные, но и абсолютные измерения спектральных плотностей излучения космических радиоисточников в диапазоне от 10 до 25 МГц с достаточно высокой точностью. Наблюдения велись по ряду радиоастрономических программ: измерение спектров и координат космических радиоисточников в декаметровом диапазоне, исследование радиоизлучения Солнца (“спокойного” и спорадического), прием сигналов пульсаров, радиоспектроскопические исследования, прием радиоизлучения Юпитера, поиск радиоизлучения других планет Солнечной системы. Однако для решения одной из важнейших задач современной радиоастрономии – изучения детальной угловой структуры радиоизлучения многих космических радиоисточников (радиогалактик, квазаров, остатков сверхновых звезд и неотожествленных объектов) – углового разрешения радиотелескопа УТР-2 оказалось совершенно недостаточно, как впрочем и в более коротковолновых диапазонах, где угловое разрешение инструментов на несколько порядков выше, чем у УТР-2. С целью изучения тонкой структуры радиоизображения космических объектов на высоких частотах перешли к широкому применению радиоинтерферометров и основанных на них систем супер- и апертурного синтеза. К аналогичному решению проблемы необходимо было переходить и в декаметровом диапазоне. С таким предложением академик НАН Украины Семен Яковлевич Брауде обратился к президенту НАН Украины академику Борису Евгеньевичу Патону. Президенту Академии это предложение сразу понравилось, и он, не откладывая решение вопроса в долгий ящик, тут же вместе с С. Я. Брауде начал намечать на карте Украины места

размещения инструментов будущей системы интерферометров, названной впоследствии УРАН (Украинские интерферометры Академии наук). Таким образом “крестными отцами” будущей радиоинтерферометрической системы, предназначенной для работы в декаметровом диапазоне волн, стали академики НАН Украины С. Я. Брауде и Б. Е. Патон. Столь быстрое решение вопроса имело как положительную, так и отрицательную сторону. К положительной следует отнести то, что новые антенны, образующие систему УРАН [2], были сравнительно быстро сооружены. К отрицательной – неоптимальное их расположение с точки зрения техники радиоинтерферометрических наблюдений. Радиотелескопы системы УРАН были построены в намеченных пунктах с помощью только академических организаций: УРАН-1 – Институтом радиофизики и электроники и Радиоастрономическим институтом в районе г. Чугуева Харьковской области, УРАН-2 – Полтавской гравиметрической обсерваторией Института геофизики в селе Степановка Полтавской области, УРАН-3 – Львовским физико-механическим институтом в районе г. Шацка Волинской области и УРАН-4 – Одесским отделом Главной астрономической обсерватории (впоследствии вошедшим в Радиоастрономический институт) в районе поселка Беляевка Одесской области. Координаты, максимальные размеры антенн, базы D и угловое разрешение* $\Delta\theta$ в угловых секундах радиоинтерферометров УРАН приведены в таблице. Здесь D – расстояние от центра данной антенны до центра антенны “Север–Юг” УТР-2.

Размещение приведенных в таблице антенн УРАН по территории Украины показано на рис. 1.

*Здесь угловое разрешение, как обычно, определяется угловым размером космического радиоисточника на уровне 50 % интенсивности с гауссовым распределением радиояркости, при котором модуль функции видимости при наблюдении его на радиоинтерферометре изменяется от 1 до 0.8.

Таблица. Координаты и параметры интерферометров УРАН

Название инструмента	Географическая широта (северная)	Географическая долгота (восточная)	Размеры антенны вдоль направлений север-юг и запад-восток, м	D , км	$\Delta\theta$, ^{''} (на частоте 25 МГц)
Утр-2, Антенна "Север-Юг"	49°38'40"	36°56'30"	1860×53		~1620
УРАН-1	49°39'50"	36°21'20"	28×193	42.3	~15
УРАН-2	49°37'57"	34°49'36"	118×238	152.3	~4
УРАН-3	51°28'32"	23°49'33"	58×238	946.2	~0.66
УРАН-4	46°23'51"	30°16'24"	28×238	613.1	~1



Рис. 1. Размещение антенн системы УРАН на территории Украины

Разрешение интерферометра, как известно, не зависит от его антенн и определяется только величиной базы D и ее ориентацией в пространстве. Характеристики антенн задают чувствительность радиоинтерферометрического приема, пропорци-

ональную $\sqrt{A_1 A_2}$, где $A_{1,2}$ – эффективные площади антенн, а также пространственную фильтрацию полезного принимаемого сигнала для устранения “спутывания” – влияния на наблюдения излучения всех радиисточников, кроме исследуемого. В систе-

ме УРАН такая фильтрация по склонению обеспечивалась антенной “Север–Юг” УТР-2, ориентированной длинной стороной вдоль меридиана, а по прямому восхождению – антеннами радиотелескопов УРАН, которые были расположены длинными сторонами вдоль параллели.

Обычно интерференционные измерения проводятся путем приема радиосигналов от двух и более разнесенных в пространстве антенн, перемножения их сигналов и выделения биений разностной частоты – интерференционных колебаний, несущих информацию о распределении радиояркости наблюдаемого источника излучения. При этом определяется комплексная функция видимости $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{U}/S}{\dot{U}_0/S_0},$$

где \dot{U} – комплексная амплитуда сигнала,

$$\dot{U}(t) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\delta, \alpha) F(\delta, \alpha, t) d\delta d\alpha,$$

принимаемого в момент времени t на выходе интерферометра (отклик) с диаграммой направленности $F(\delta, \alpha, t)$ при наблюдении радиоисточника с распределением радиояркости $\Phi(\delta, \alpha)$ и спектральной плотностью радиоизлучения S , а U_0 и S_0 – те же величины при наблюдении эталонного источника с очень малыми угловыми размерами (точечного).

Оптимальным для определения радиоизображения $\Phi(\delta, \alpha)$ является такое размещение антенн радиоинтерферометров, когда они находятся в вершинах многоугольника (треугольника). При этом, при примерно одинаковых эффективных площадях всех антенн, сигнал, принятый каждой из них, перемножается с сигналами всех остальных антенн. В таких системах (условно называемых “полигамными”), состоящих из N антенн, образуется $N(N-1)/2$ откликов ин-

терферометров, так называемых пространственных частот различных сечений распределения радиояркости источника, сумма которых (обратное фурье-преобразование) позволяет восстановить картину радиоизображения. В том случае, когда эффективная площадь только одной антенны системы интерферометров является достаточно большой, эффективный прием с требуемым отношением полезного сигнала к шумам и помехам может вестись только при перемножении сигнала этой антенны с другими (“моногоамная” система интерферометров). При этом число получаемых при наблюдении пространственных частот изображения равно $(N-1)/2$, т. е. существенно меньше, чем в первом случае. Именно такой, как показали измерения, является система УРАН из-за сравнительно небольших эффективных площадей всех антенн, кроме антенны “Север–Юг” УТР-2. К тому же не все антенны УРАН находятся в вершинах многоугольников, так как радиотелескопы УТР-2, УРАН-1 и УРАН-2 располагаются вдоль линии, практически совпадающей с параллелью. По этой причине не мог быть использован так называемый в технике интерферометрии метод “замкнутых” фаз, когда путем суммирования фаз всех функций видимости, определенных в данном многоугольнике, могут быть устранены фазовые ошибки из-за флуктуаций сигналов при распространении радиоволн и при их усилении. По этим причинам система УРАН могла быть использована только для измерения модулей функций видимости γ :

$$\gamma = \frac{U/S}{U_0/S_0}$$

и определения по этим измерениям вместо карт распределения радиояркости радиоисточников их наиболее вероятных моделей, отражающих основные тенденции карт.

Антенны интерферометров УРАН были созданы на основе тех же принципов, что и УТР-2, в виде многорядных антенных решеток с электрическим управлением лучом по двум угловым координатам. Однако

излучатели этих антенн, в отличие от линейных вибраторов УТР-2, были выполнены в виде широкополосных турникетных излучателей, ориентированных под углами $\pm 45^\circ$ к линии меридиана. Каждая из линейных поляризаций этих антенн имела свою автономную систему суммирования и фазирования высокочастотных сигналов, так что одновременно проводился независимый прием сигналов двух ортогональных (при приеме в зенит) линейных поляризаций. Сигналы этих двух линейных поляризаций антенн УРАН перемножались с сигналами линейной поляризации УТР-2, так что фактически на любой базе одновременно вели прием два независимых интерферометра. Это было необходимо для устранения влияния на измерения эффекта Фарадея – поворота плоскости поляризации принимаемых сигналов из-за воздействия космической плазмы при распространении радиоволн, – по-разному проявляющегося в разнесенных пунктах. В противном случае этот эффект мог приводить к существенным ошибкам при измерениях, особенно в декаметровом диапазоне волн. Внешний вид одной из антенн УРАН (УРАН-1) приведен на рис. 2.

Методика измерений и обработки данных в декаметровом диапазоне волн

Измерения на интерферометрах УРАН из-за существенного влияния ионосферы и плазмы солнечной сверхкороны проводились, как правило, в осенний, зимний и весенний периоды в ночное время суток при больших элонгациях (углах между направлением на радиисточник и центр Солнца). Измерения велись в диапазоне от 25 до 16.7 МГц одновременно на двух частотах [3-6], чаще всего на 25 и 20 МГц. При наблюдении за радиисточником лучи радиотелескопов переключались дискретно с интервалом 20 мин, в пределах которого велись записи высокочастотных сигналов и определялись модули функции видимости при разных часовых углах источника T_0 в пределах обычно не менее ± 2 часов относительно момента кульминации радиисточника – пересечения объектом вертикальной плоскости, проходящей через меридиан на юге. Радиointерферометр с малой базой (УРАН-1) работал в основном в режиме реального времени, т. е. интерференционные сигналы наблю-



Рис. 2. Фотография антенны УРАН-1

дались прямо во время эксперимента. Для этого высокочастотные сигналы с выхода антенны “Север–Юг” УТР-2 транслировались радиорелейной линией в приемный пункт УРАН-1, где производилось перемножение сигналов обеих линейных поляризаций антенны УРАН-1 и выделение интерференционных биений. Все остальные интерферометры работали только в режиме РСДБ (радиоинтерферометров со сверхдлинной базой), когда перемножение высокочастотных сигналов, записанных предварительно на магнитный носитель, проводилось после эксперимента при дальнейшей обработке информации. Для исключения влияния на результаты измерений временной декорреляции сигналов из-за различного запаздывания во времени сигналов разных антенн до перемножения опережающие сигналы задерживались во времени относительно расчетных значений для получения максимальной огибающей интерференционных биений. На всех интерферометрах, работавших в режиме РСДБ, записи сигналов достаточно точно синхронизировались во времени с помощью спутниковой системы точного времени. Для обеспечения требуемой когерентности перемножаемых высокочастотных сигналов в гетеродинах всех радиоприемников использовались синтезаторы частоты с рубидиевыми стандартами. Ослабление влияния радиовещательных и других помех обеспечивалось применением узкополосных приемников (с полосой пропускания 20 кГц) и их оптимальной настройкой. Кроме того, для повышения чувствительности и дополнительного ослабления помех и шумов полученные интерференционные колебания перед дальнейшей обработкой фильтровались оптимальным образом.

Уже первые наблюдения на УРАН-1 показали, что применяемая на более высоких частотах методика градуировки интерферометрических измерений в декаметровом диапазоне не может быть использована. Прием с этой целью сигналов опорных точечных радиоисточников, имеющих модуль функции видимости $\gamma \cong 1$, или наблю-

дения одновременно двумя радиоинтерферометрами при достаточно малой базе одного из них, чтобы γ наблюдаемых на нем радиоисточников были примерно равны 1, в декаметровом диапазоне по ряду причин применить не удалось.

Поэтому была разработана иная методика градуировки интерференционных сигналов, при которой, кроме интерферометрических наблюдений, одновременно (что необходимо из-за нестационарности принимаемых в этом диапазоне сигналов) с помощью модуляционных радиометров мощности проводились измерения наблюдаемых сигналов на выходах антенн радиоинтерферометров. Градуировка с использованием широкополосных псевдошумовых генераторов, синхронизируемых сигналами точного времени, на выходах антенн обеспечивала сигналы такой же мощности, как при наблюдениях, либо отношение их мощностей точно определялось. Посредством перемножения этих сигналов формировались искусственные интерференционные колебания, которые соответствовали приему сигнала гипотетического точечного источника такой же мощности, как наблюдаемого, но с $\gamma = 1$.

Наиболее адекватный метод обработки полученных на системе УРАН данных определялся нахождением наиболее достоверных моделей распределения радиояркости космических радиоисточников. В качестве составляющих таких моделей использовались наборы компонентов источников разных угловых размеров с разной спектральной плотностью излучения и гауссовым распределением радиояркости. При этом компоненты модели в общем случае могли быть эллиптическими с произвольными углами поворота осей и координатами относительно выбранного центра. Для разных параметров выбранных моделей рассчитывались часовые зависимости модуля функции видимости $\gamma_p(T_0)$, которые сопоставлялись с аналогичными зависимостями $\gamma_s(T_0)$, полученными в эксперименте. Зависимости $\gamma_p(T_0)$ для k -й пары интерферометров определялись выражением:

$$\gamma_p(T_0) = \left| \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_0} \gamma_i(T_0) \exp[j\varphi_i(T_0)] \right|,$$

где

$$\gamma_i = \exp \left[-3,556 / (1 - R_i^2) \right] \left[\Delta\theta_{\alpha_i}^2 U_k^2(T_0) - 2\Delta\theta_{\alpha_i} \Delta\theta_{\delta_i} R_i U_k(T_0) V_k(T_0) + \Delta\theta_{\delta_i}^2 V_k^2(T_0) \right],$$

$$\frac{1}{\Delta\theta_{\alpha_i}^2} = \frac{\cos^2 \psi_i}{\Delta\theta_{\max_i}^2} + \frac{\sin^2 \psi_i}{\Delta\theta_{\min_i}^2},$$

$$\frac{1}{\Delta\theta_{\delta_i}^2} = \frac{\sin^2 \psi_i}{\Delta\theta_{\max_i}^2} + \frac{\cos^2 \psi_i}{\Delta\theta_{\min_i}^2},$$

$$R_i = \Delta\theta_{\alpha_i} \Delta\theta_{\delta_i} \cos \psi_i \sin \psi_i \left(\frac{1}{\Delta\theta_{\max_i}^2} - \frac{1}{\Delta\theta_{\min_i}^2} \right),$$

$$\varphi_i(T_0) \cong \frac{2\pi D}{\lambda} (\Delta\alpha_i \cos T_0 + \Delta\delta_i \sin \delta_0 \sin T_0).$$

Здесь $\varphi(T_0)$ – фаза функции видимости i -го компонента относительно первого, выбранного в качестве начала отсчета; $\gamma_i(T_0)$ – модуль функции видимости i -го компонента; n – число компонентов модели распределения радиояркости источника; δ_0 – среднее склонение источника; α_i , δ_i , $\Delta\theta_{\alpha_i}^*$, $\Delta\theta_{\delta_i}^*$, $\Delta\theta_{\max_i}^*$, $\Delta\theta_{\min_i}^*$ – прямое восхождение, склонение, угловые размеры по прямому восхождению и склонению, максимальный и минимальный угловые размеры i -го компонента соответственно; $\Delta\alpha_i = \alpha_i - \alpha_1$; $\Delta\delta_i = \delta_i - \delta_1$; ψ_i – угол между положением большой оси i -го компонента

*Здесь и ниже угловые размеры компонентов приводятся на уровне 50 % интенсивности при гауссовом распределении радиояркости.

и направлением на запад, отсчитываемый по часовой стрелке (позиционный угол равен $\psi_i - 90^\circ$); S_i – спектральная плотность потока излучения i -го компонента модели;

$S_0 = \sum_{i=1}^n S_i$ – полная спектральная плотность радиоизлучения космического источника; $U_k(T_0)$ и $V_k(T_0)$ – пространственные частоты распределения радиояркости радиоисточника на UV – плоскости, воспроизводимые k -ым интерферометром.

Варьированием параметров модели достигалось оптимальное согласование расчетных и экспериментальных данных. В качестве меры соответствия расчетной модели эксперименту использовался известный χ^2 – критерий [7]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\hat{\gamma}_i(T_0) - \gamma_p(T_0)}{\sigma_{\hat{\gamma}_i}(T_0)} \right]^2,$$

где N – число независимых измерений средневзвешенных значений модуля функции видимости $\hat{\gamma}_i$, со среднеквадратичной ошибкой $\sigma_{\hat{\gamma}_i}$ при разных часовых углах T_0 . Наиболее достоверной считалась модель распределения радиояркости, которой соответствовал минимум χ_{\min}^2 при достаточно большой вероятности его превышения $W_p(\chi^2 > \chi_{\min}^2)$ [7], где $p = N - 1 - p_1$. Здесь p – число степеней свободы распределения χ^2 , p_1 – число параметров модели распределения радиояркости.

Для сравнения полученных для декаметрового диапазона моделей распределения радиояркости с высокочастотными данными, для которых обычно приводятся карты распределения радиояркости (“радиоизображения” объектов), с помощью аналогичной методики определялись модели распределения радиояркости для высоких частот, причем в ряде случаев эти модели являлись исходными при определении оптимальных моделей распределения радиояркости источников для декаметрового диапазона волн.

Результаты радиоинтерферометрических наблюдений в декаметровом диапазоне радиоволн

В связи со сложностью проведения таких экспериментов – наблюдение за сутки не более двух-трех объектов (в течение нескольких месяцев), большое число недостоверных данных из-за влияния ионосферы Земли, сверхкороны Солнца и различных помех – за прошедшие годы на системе УРАН удалось провести наблюдения всего нескольких десятков различных источников космического радиоизлучения: радиогалактик, квазаров, остатков сверхновых звезд, пульсаров и неотожествленных объектов. Все эти объекты – нетепловые радиоисточники с магнитотормозным (синхротронным) механизмом излучения со степенными спектральными характеристиками на высоких частотах $S \sim \nu^{-\alpha}$, где S – спектральная плотность излучения, ν – частота, α – спектральный индекс. При этом наиболее достоверные модели распределения радиояркости в декаметровом диапазоне радиоволн были установлены примерно у двадцати космических радиоисточников. Ряд объектов с большими угловыми размерами даже на самой малой базе были разрешены, и их не удалось наблюдать из-за очень малой величины модуля функции видимости ($\gamma \rightarrow 0$).

Особенностью проведенных измерений являлось то, что, наряду с определением угловой структуры излучения радиоисточников, одновременно определялись спектральные плотности радиоизлучения как всего радиоисточника, так и отдельных его компонентов. Одновременное определение модели радиоизображения источника и его спектральных характеристик позволяло в ряде случаев объяснить наблюдаемые изменения этих моделей в зависимости от диапазона волн различными физическими процессами, протекающими в космосе. При этом удавалось оценить параметры космической среды: электронную температуру, меру эмиссии плазмы (электронную концентрацию), напряженность космических

магнитных полей, а также угловые размеры космических радиоисточников или их отдельных компонентов.

Несмотря на сравнительно небольшое количество научных данных, полученных к настоящему времени, ряд достоверных выводов может быть сделан уже сейчас. Прежде всего, следует отметить, что ожидаемое существенное изменение радиоизображений космических радиоисточников в декаметровом диапазоне радиоволн по сравнению с их структурой на более высоких частотах из-за влияния космической плазмы в большинстве случаев подтвердилось. Как правило, изменения в характере степенного спектра космических радиоисточников соответствовало определенному изменению их структуры. Влияние среды на радиоизлучение источников в первую очередь было связано с затуханием излучения в плазме из-за эффекта самопоглощения синхротронного излучения (синхротронной реабсорбции), поглощения излучения в облаках космической плазмы, находящейся на пути распространения радиоволн или расположенной в самих космических радиоисточниках (компонентах). На спектры и соответственно структуру углового распределения радиоизлучения реже могли влиять так называемый эффект Разина–Цытовича [8], обрыв энергетического спектра релятивистских электронов в области малых энергий и другие процессы. Кроме того, на радиоизображении космических радиоисточников сказывалась способность “высвеченных” релятивистских электронов в слабых магнитных полях, расположенных вокруг радиоисточников, генерировать радиоволны низкой частоты, причем с повышением частоты спектральная плотность такого излучения быстро падала.

Эффект реабсорбции как правило наблюдался у квазаров и компактных деталей, например в ядрах радиогалактик. Изменение спектров таких объектов могло быть связано также с затуханием излучения в плазме, находящейся на трассе распространения радиоволн. Изменение спект-

ральных характеристик излучения протяженных объектов чаще всего бывает связано с затуханием их излучения в плазме, находящейся в самом радиоисточнике. Во всех этих случаях на спектральных характеристиках источников степенного типа (линейных в масштабе $\lg S \div \lg \nu$), появляются максимумы спектральной плотности излучения S_m на определенной частоте ν_m , ниже которой при дальнейшем уменьшении частоты величина $S(\nu)$ падает. Закон изменения спектральной плотности излучения с частотой в данном частотном интервале зависит от физического процесса, вызывающего затухание излучения. Поэтому по виду спектральной характеристики на частотах меньше ν_m этот механизм можно определить.

В любом случае при появлении на спектральных характеристиках радиоисточников или их компонентов экстремумов на более низких, чем ν_m , частотах излучение этих объектов с понижением частоты монотонно затухает, и в пределе они не наблюдаются в измененной модели распределения радиояркости. В тех случаях, когда в космических радиоисточниках или их компонентах имеет место реабсорбция, при экспериментальном определении величин ν_m и S_m может быть найден угловой размер объекта или напряженность магнитного поля в нем. Определенный таким способом собственно угловой размер излучающего объекта существенно отличается в декаметровом диапазоне радиоволн от измеренного у поверхности Земли методами интерферометрии из-за влияния рассеяния радиоволн данного диапазона в космической плазме. Сопоставлением угловых размеров объектов, полученных двумя этими способами, можно оценить углы рассеяния излучения в космосе и определить их зависимость от координат и частоты.

Эффекты, связанные с излучением достаточно низкочастотных колебаний релятивистскими электронами в слабых магнитных полях, окружающих космические источники, приводят к увеличению их угловых размеров с понижением частоты.

Кроме того, возможно с этим связано появление на низких частотах, в частности в декаметровом диапазоне, вокруг радиоисточников так называемых “гало” – больших угловых размеров ореолов с малой поверхностной яркостью. Спектральные индексы излучения гало могут быть достаточно большими. В таких случаях спектральная плотность их излучения быстро падает с ростом частоты, из-за чего на высоких частотах они уже не наблюдаются при недостаточном динамическом диапазоне приема или при невозпроизведении соответствующих пространственных частот изображения.

Для иллюстрации полученных данных при исследованиях космических радиоисточников с помощью системы УРАН приведем в качестве примера результаты наблюдений двух космических объектов – радиогалактики 3С234 и квазара 3С254.

Наблюдение радиогалактики 3С234 в декаметровом диапазоне радиоволн

Радиогалактики 3С234 ассоциируется с оптической галактикой с красным смещением $z = 0.185$, находящейся на краю небольшой группы галактик, и является классическим объектом с крутым спектром $\alpha \approx 0.99$ на высоких частотах. Угловая структура излучения этой галактики изучалась в ряде работ различными методами в широком диапазоне частот от 20 до 15375 МГц, причем наиболее детально, естественно, в сантиметровом и коротковолновой части дециметрового диапазона. На этих частотах радиогалактика 3С234 содержала 3 компактных компонента – два ярких, расположенных на ее краях (юго-западный и северо-восточный), разнесенных примерно на $110''$ при позиционном угле 66° с угловыми размерами меньше $2''$ и слабо излучающий центральный компонент (ядро) с угловым размером меньше $1''$, расположенный между первыми двумя вблизи оптической галактики. Излучение всех компактных компонентов составляло около 60 % от общего радиоизлучения

объекта. Остальное излучение обеспечивалось протяженными областями с малой поверхностной яркостью, имеющими очень сложную структуру. Радиокарта этого источника, определенная на частоте 8440 МГц [9], иллюстрируется рис. 3. Здесь же для сравнения приведены простейшие оптимальные модели распределения радиояркости источника в виде ряда эллипсов, для частоты 8440 МГц – сплошными линиями и 25 МГц – штриховыми. Цифры на рисунке – номера компонентов моделей. Наблюдения 3С234 в декаметровом диапазоне радиоволн проводились на радиоинтерферометрах УРАН-1 и УРАН-2 одновременно на частотах 25 и 20 МГц в 1996 и 1999 гг. [10].

Модели распределения радиояркости 3С234, полученные для сантиметровых и декаметровых волн, позволяют провести не только качественное, но и количественное их сравнение и определить изменение радиоизображения радиогалактики с частотой.

Во-первых, относительные координаты центров компактных компонентов на обе-

их частотах практически одинаковы. Расхождения не превышают приведенных погрешностей и связаны, возможно, не только с ошибками измерений и обработки данных, но и с тем, что реальные радиоизображения компактных компонентов отличаются от симметричных гауссовых. Отметим, что на рис. 3 положение компонента 1 совмещалось с компактной деталью в юго-западном лепестке радиогалактики. При этом компонент 5 не точно совпадает с соответствующей деталью в северо-восточном лепестке карты как для низкочастотной, так и для высокочастотной моделей. Это объясняется сложным распределением радиояркости в прилежащих к этим деталям областях, которое не учитывается в приведенных моделях.

Во-вторых, доля излучения компактных компонентов 1 и 5 в общем потоке радиоизлучения источника, как следовало из спектральных измерений, заметно падала с понижением частоты, особенно для 5-го компонента, и, как следует из спектральных измерений их плотностей потока, оказывается меньше экстраполированных с посто-

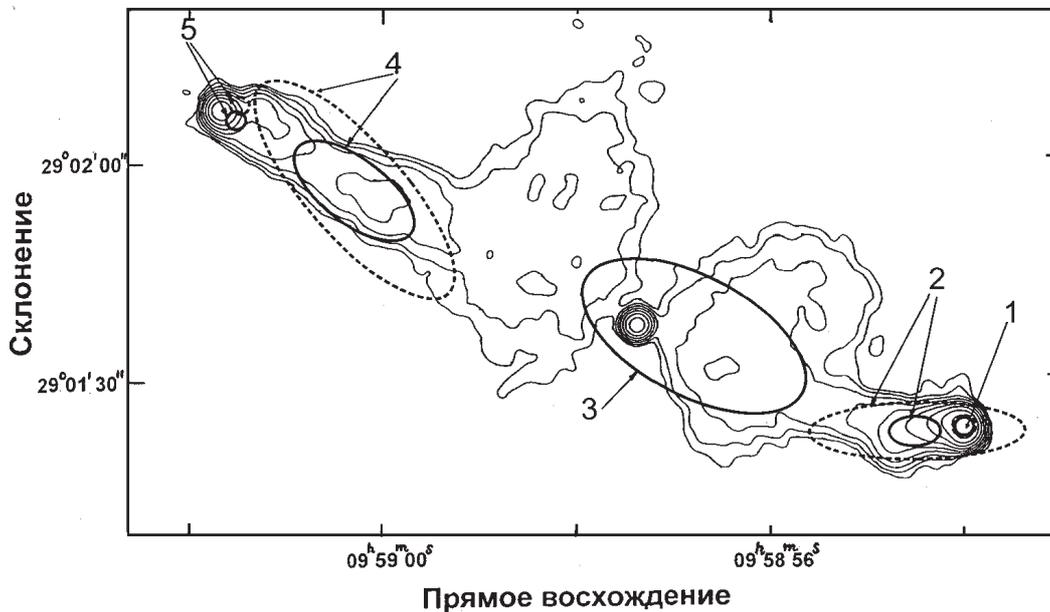


Рис. 3. Оптимальные модели распределения радиояркости радиогалактики 3С234 на частоте 8440 МГц (сплошные кривые) и 25 МГц (штриховые кривые) на карте радиогалактики на частоте 8440 МГц

янным спектральным индексом от высоких частот “линейных” (в логарифмическом масштабе) спектральных зависимостей.

В-третьих, размеры компонентов 2 и 4 увеличились на декаметровых волнах в 2÷4 раза по сравнению с их размерами, определенными на сантиметровых волнах. Доля их потока в общем излучении источника возрастает с 30 % на частоте 8440 МГц до примерно 70 % на частотах 25 и 20 МГц, что свидетельствует об увеличении спектральных индексов этих компонентов с понижением частоты.

В-четвертых, наиболее удивительным является отсутствие в определенных для декаметровых волн моделях распределения радиояркости 3С234 центрального протяженного компонента 3, изображающего диффузное протяженное излучение областей галактики, прилегающих к ее ядру.

Анализ спектральных измерений компактных компонентов распределения радиояркости, приведенных на рис. 3, показал, что заметное уменьшение роли компактных компонентов 1 и 5 радиогалактики 3С234 в излучении в декаметровом диапазоне по сравнению с более высокими частотами объясняется эффектом синхротронной реабсорбции в данных компонентах. С помощью этих измерений удалось также определить собственные угловые размеры компактных компонентов, которые невозможно было измерить интерферометрическим методом из-за недостаточного разрешения инструментов и влияния космической среды. Оказалось, что угловой размер компактного компонента 1 (юго-западного) равен $0.55' \pm 0.05''$ и компонента 2 (северо-восточного) – $0.27'' \pm 0.03''$, что хорошо согласуется с прямыми измерениями угловых размеров этих компонентов, проведенными на системе VLA на частоте 15 ГГц [11], где размеры компонентов равны $0.7 \times 0.3''$ в первом и $0.4 \times 0.25''$ во втором случае в условиях, когда космическая среда не влияла на результаты измерений.

Иные результаты получены для спектральной зависимости центрального протяженного компонента 3, не наблюдаемого

в декаметровом диапазоне. Оказалось, что излучение этого компонента поглощается в плазме, находящейся в нем. Найденные при этом параметры плазмы – электронная температура $T_e \cong 32$ К, мера эмиссии $N_e^2 L \cong 112 \text{ см}^{-6} \cdot \text{пк}$ и электронная концентрация $N_e \cong 0.04 \text{ см}^{-3}$ – соответствовали низкотемпературным областям ионизированного углерода СII, определенным в [12] при исследованиях рекомбинационных линий углерода в декаметровом диапазоне волн.

Таким образом, основное излучение 3С234 в декаметровом диапазоне волн (69 % на 25 МГц и 73 % на 20 МГц) обеспечивается протяженными компонентами 2 и 4, причем из-за падения доли компактных компонентов в общем излучении галактики при дальнейшем уменьшении частоты ниже 20 МГц можно ожидать, что четырехкомпонентная модель распределения радиояркости этого объекта на 25 и 20 МГц на более низких частотах окажется двухкомпонентной.

Наблюдения квазара 3С254 в декаметровом диапазоне радиоволн

Радиоизображение и спектральные характеристики квазара 3С254 исследованы в широком интервале частот от 20 до 15400 МГц методами радиоинтерферометрии, супер- и апертурного синтеза. Изображение этого радиоисточника в дециметровом диапазоне оказалось состоящим из двух компактных компонентов – северо-западного и юго-восточного, разнесенных примерно на $13.2''$ при позиционном угле $106^\circ \pm 1^\circ$, причем юго-восточный компонент расположен вблизи оптического квазара с $z = 0.734$. Размеры компонентов определены менее точно (от $0.5''$ до $1.5''$), что объясняется недостаточным угловым разрешением, различиями в методиках измерений и их погрешностями, а также, возможно, зависимостью результатов измерений от частоты. Отношение спектральных плотностей излучения компонентов изменялось в зависимости от частоты от 0.6 до 1.2.

Наблюдения этого радиоисточника в декаметровом диапазоне радиоволн проводилось с помощью радиоинтерферометров УРАН-1 и УРАН-2 на частотах 25 и 20 МГц в осенне-зимний период 1993-1994 гг. [13]. На основании этих наблюдений удалось установить, что модель распределения радиояркости этого квазара в декаметровом диапазоне радиоволн, как и на высоких частотах, двухкомпонентная, но типа “ядро-галло”, состоящая из одного компактного и одного впервые обнаруженного протяженного компонента. Однако на основании радиоинтерферометрических измерений из-за недостаточного углового разрешения интерферометров УРАН-1 и УРАН-2 удалось определить только размер протяженного компонента $\Theta_{\text{п}} = 20.5'' \pm 6''$ и оценить верхнюю границу размера компактного $\Theta_{\text{к}} < 1.5 \div 2.0''$. Более точно размер и положение компактного компонента определил анализ спектральных характеристик квазара.

Оказалось, что в декаметровом диапазоне наблюдаемый компактный компо-

нент совпадает с северо-западным компонентом высокочастотных карт квазара, размер его на низких частотах $\Theta_{\text{с-з}} \cong 0.5''$. Второй компактный компонент (юго-восточный) квазара на декаметровых волнах с размером $0.04''$ не наблюдается из-за эффекта синхротронной реабсорбции в нем.

Наиболее вероятная простейшая модель распределения радиояркости квазара 3C254 в декаметровом диапазоне радиоволн приведена на рис. 4 на фоне его высокочастотной карты на частоте 5 ГГц [14]. Из анализа спектральных характеристик квазара в декаметровом диапазоне волн следовало, что из-за быстрого падения спектральной плотности излучения северо-западного компонента ($\approx \nu^{5/2}$) вследствие эффекта реабсорбции в нем, при дальнейшем уменьшении частоты ниже 20 МГц модель распределения радиояркости квазара 3C254 может оказаться однокомпонентной, состоящей только из протяженного галло.

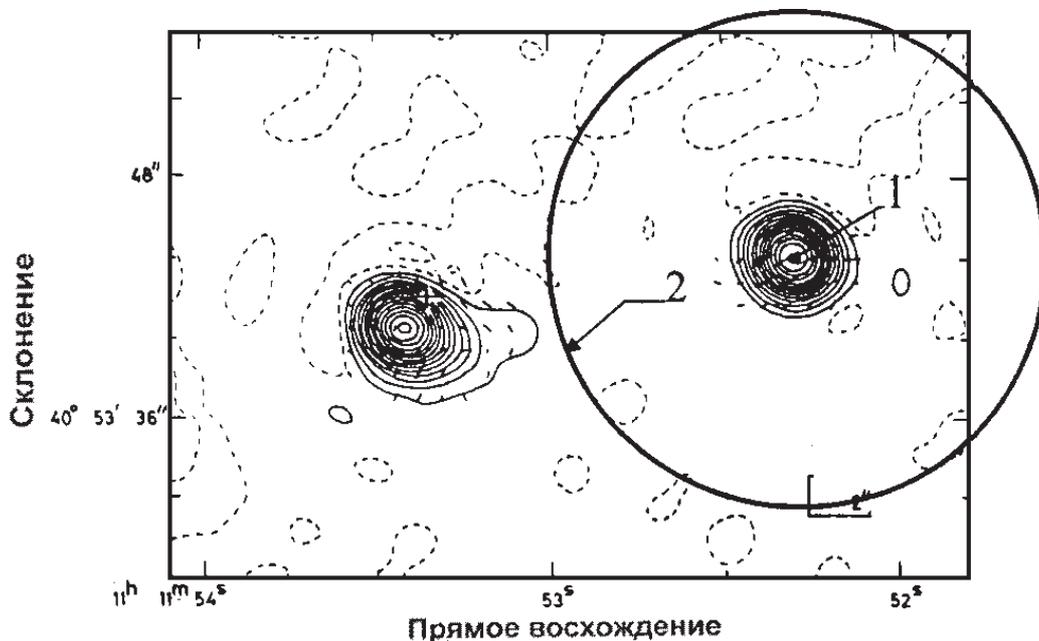


Рис. 4. Оптимальная простейшая модель распределения радиояркости 3C254 типа “ядро-галло” для декаметрового диапазона волн на фоне радиокарты источника на частоте 5 ГГц: 1 – компактный юго-западный компонент, 2 – протяженный компонент (галло)

Перспективы дальнейших радиointерферометрических наблюдений в декаметровом диапазоне радиоволн

Основными характеристиками радиointерферометра, как известно, являются разрешающая способность и чувствительность, определяемые отношением длины базы к длине волны D/λ , эффективной площадью антенн и чувствительностью приема P_{\min} . С точки зрения разрешающей способности в радиointерферометрах УРАН-3 и УРАН-4 была достигнута практически предельная разрешающая способность около $1''$, которая в принципе может быть реализована в декаметровом диапазоне волн. Из-за влияния галактической и метагалактической плазмы углы рассеяния принимаемого излучения даже на частоте 25 МГц оказываются не менее $1''$, возрастающая ($\sim \nu^{-2}$) при дальнейшем понижении частоты. Поэтому обеспечить существенно более высокое угловое разрешение, даже в коротковолновой части декаметрового диапазона волн, не удастся, даже если размещать радиointерферометры на больших удалениях от Земли (вне Солнечной системы).

Иная ситуация с чувствительностью системы УРАН, которая может быть существенно повышена либо путем увеличения эффективных площадей антенн интерферометров, либо расширением полосы пропускания частот радиоприемной аппаратуры интерферометров. Эта задача представляется важной для современной астрофизики, так как при значительном увеличении числа излучающих в декаметровом диапазоне объектов, наблюдаемых с высоким угловым разрешением, существенно расширятся и уточнятся наши представления о Вселенной. При этом могут быть определены важные физические характеристики различных космических радиисточников: общая излучаемая мощность в широком интервале частот, полная энергия и число релятивистских частиц, обеспечивающих космическое радиоизлучение, напряженность космических магнитных полей – и та-

кие параметры космической среды, как электронная температура и мера эмиссии (электронная концентрация). Кроме того, в целом ряде случаев могут быть установлены и изучены протекающие в космосе физические процессы, вызывающие затухание космического излучения на низких частотах.

Первый способ повышения чувствительности приема путем увеличения антенн интерферометров сопряжен с большими материальными затратами и пока практически нереален, но второй – путем расширения полосы принимаемых частот – может быть реализован в ближайшее время. В системе УРАН прием проводился в полосе частот 20 кГц, которая в принципе может быть увеличена минимум в 10 раз. При этом число наблюдаемых космических радиисточников возрастет минимум до нескольких сот, правда понизится помехоустойчивость приема и потребуются разработка дополнительных методов борьбы с помехами. Эффективным способом уменьшения влияния на прием космического излучения радиовещательных и других помех может быть размещение декаметровых радиointерферометров на больших удалениях от Земли в пространстве над ионосферными слоями, например, на поверхности Луны (на ее обратной стороне). При этом появится возможность проводить радиointерферометрические наблюдения в длинноволновой части декаметрового диапазона и даже на более длинных радиоволнах.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность всем сотрудникам Национальной академии наук Украины, принимавшим участие в наблюдениях на системе декаметровых радиointерферометров УРАН.

Литература

1. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2 / А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин, Ю. М. Брук, П. А. Мельяновский, Г. А. Инютин, Н. Ю. Гон-

- чаров. – Антенны. Сб. статей. Вып. 26 / Под ред. А. А. Пистолькорса. – М.: Связь, 1978. – С. 15-57.
2. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л. и др. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. I). Основные принципы. Обзор // Радиофизика и Радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, №4. – С. 385-401.
 3. Бовкун В. П., Мень А. В. Интерферометрические наблюдения на декаметровых волнах (обзор) // Известия вузов. Радиофизика. – 1983. – Т. 26, №11. – С. 1357-1370.
 4. Мень А. В., Рашковский С. Л., Шепелев В. А. и др. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. II). Аппаратура и методика наблюдений // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Т. 3, №3. – С. 284-293.
 5. Рашковский С. Л. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. III). Методика и алгоритмы обработки результатов экспериментов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, №1. – С. 20-28.
 6. Мень А. В., Рашковский С. Л., Шепелев В. А. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. IV). Моделирование структуры источников // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, №1. – С. 9-20.
 7. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
 8. Разин В. А. К теории спектров радиоизлучения дискретных источников на частотах ниже 30 МГц // Известия вузов. Радиофизика. – 1960. – Т. 3, №4. – С. 584-594.
 9. Hardcastle M. J., Alexander P., Pooley G. G. et al. // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. – 1997. – Vol. 288. – P. 859.
 10. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Ващишин Р. В., Браженко А. И., Булацен В. Г. Экспериментальное исследование угловой структуры излучения радиогалактики 3C234 в декаметровом диапазоне радиоволн // Астрономический журнал. – 2003. – Т. 80, №12. – С. 1127-1135.
 11. Dreher J. W. // Astron. J. – 1981. – Vol. 86, No. 6. – P. 833.
 12. Коноваленко А. А. Наблюдения рекомбинационных линий углерода на декаметровых волнах в направлении источника Кассиопея А // Письма в астрономический журнал. – 1984. – Т. 10, №11. – С. 846-853.
 13. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Браженко А. И., Булацен В. Г.

- Интерферометрические наблюдения квазара 3C254 в декаметровом диапазоне радиоволн // Кинематика и физика небесных тел. – 1996. – Т. 12, №6. – С. 3-12.
14. Pooley G. G., Henbest S. N. // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. – 1974. – Vol. 169. – P. 477.

Радиоінтерферометричні дослідження кутової структури космічних радіоджерел у декаметровому діапазоні хвиль, виконані в Україні

А. В. Мень

Стаття присвячена створенню в Україні системи декаметрових радіоінтерферометрів УРАН з граничною кутовою роздільною здатністю близько однієї секунди дуги. Наведено основні характеристики цих інструментів, а також оригінальні методики вимірювань та обробки експериментальних даних для визначення найбільш імовірних моделей розподілу радіояскравості космічних радіоджерел у декаметровому діапазоні хвиль. Результати вимірювань ілюструються типовими прикладами спостережень радіогалактики 3C234 та квазара 3C254. Розглядаються перспективи подальших досліджень у цьому напрямку.

Ukraine's Studies of an Angular Structure of Space Radio Sources with Decameter Wavelength Interferometers

A. V. Megn

The creation of the URAN radio interferometer system with the angular resolution limit about 1 arc second is discussed. The basic characteristics of these instruments and the original experimental data measurement and processing procedures which help obtaining most probable models of brightness distribution of space radio sources at the decameter wavelengths are described. The measurements are illustrated by typical examples of the observed radio galaxy 3C234 and quasar 3C254. Research prospects for this area are discussed too.