

Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. I)* Основные принципы

А. В. Мень, С. Я. Брауде, С. Л. Рашковский, Н. К. Шарькин,
В. А. Шепелев, Г. А. Инютин, А. Д. Христенко, В. Г. Булацен,
И. Браженко, В. В. Кошевой, Ю. В. Романчев, В. П. Цесевич, В. В. Галанин

*Радиоастрономический институт НАН Украины
310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

Статья поступила в редакцию 29 января 1998 г.

В статье приводится описание сети широкополосных радиоинтерферометров УРАН, расположенных на территории Украины. Они предназначены для радиоастрономических наблюдений в декаметровом диапазоне радиоволн и обеспечивают в режиме РСДБ при приеме космического излучения практически предельное для декаметрового диапазона угловое разрешение около 1 секунды дуги.

В статті надається опис мережі широкосмугових радіоінтерферометрів УРАН, які розташовані в Україні. Ці інструменти призначені для радіоастрономічних спостережень у декаметровому діапазоні радіохвиль і забезпечують у режимі РНДБ при прийомі космічного випромінювання практично граничне для декаметрового діапазону кутове розділення, яке сягає 1 секунди дуги.

Введение

Максимальное угловое разрешение в современной радиоастрономии реализуется, как известно, с помощью методов, основанных на использовании принципов интерферометрии. При этом в сантиметровом и смежных радиодиапазонах при наблюдениях уже достигнуто разрешение до 10^{-4} угловой секунды и выше. Однако на более низких частотах, особенно в декаметровом диапазоне – наиболее длинноволновом, в котором еще можно принимать космическое излучение радиотелескопами, расположенными на поверхности Земли, регулярные интерферометрические измерения в течение многих лет практически не проводились. Более того, после первых эпизодических наблюдений на интерферометрах со сверхдлинными базами, предназначенных для измерения угловых размеров источника радиоизлучения на Юпитере [1-5], а также компактного радиоисточника (пульсара) в Крабовидной туманности [6], считалось, что надежные интерферометрические измерения в этом диапазоне вообще маловероятны. Такое заключение было связано со спецификой декаметрового диапазона – чрезвычайно высоким уровнем различных помех, значительно превышающим интенсивность принимаемых из космоса сигналов, очень высоким уровнем галактического фона, а также существенным влиянием на интерференционные сигналы ионосферы Земли, межпланетной и межзвездной плазмы.

После разработки и сооружения в Радиоастрономическом институте Национальной Академии наук Украины большого декаметрового радиотелескопа УТР-2 [7] с результирующей эффективной площадью около $150\,000\text{ м}^2$, появилась возможность создать интерферометр с угловым разрешением, существенно превышающим разрешение УТР-2, равнос 27 угловым минутам. Такой инструмент с базой 42,3 км вдоль параллели был создан на основе антенны “Север-Юг” радиотелескопа УТР-2 и специальной антенны УРАН-1 (Украинский интерферометр Академии наук), расположенной в районе города Змиев Харьковской области [8]. Уже первые наблюдения на этом интерферометре с угловым разрешением около 15 секунд дуги показали, что при определенных условиях – при больших элонгациях, в частности, в ночное время суток в осенне-зимний период – в принципе возможны регулярные наблюдения углового распределения радиоизлучения космических радиоисточников, особенно в периоды минимума солнечной активности. Правда из-за больших фазовых и амплитудных флуктуаций принимаемых сигналов измерения проводились в коротковолновой части декаметрового диапазона в интервале частот от 25 до 16,7 МГц, а на более низких частотах вероятность получения интерференционных сигналов резко уменьшалась. Выполненные нами предварительные оценки показали, что в этом диапазоне минимально наблюдаемый

* Эта статья – первая из серии, посвященной описанию системы декаметровых интерферометров УРАН, аппаратуры, методики измерений и обработки данных, а также наблюдениям, проведенным на этих интерферометрах.

угловой размер оказывается порядка 1 секунды дуги, что определяется рассеянием в межзвездной среде, и ограничивает предельное угловое разрешение, которое может быть реализовано при наблюдениях космических радиоисточников в декаметровом диапазоне волн. Этот результат был впоследствии подтвержден наблюдениями на системе УРАН компактного радиоисточника (пульсара PSR 05.31+21) в Крабовидной туманности на частотах 20 и 25 МГц.



Рис. 1. Схема размещения антенных решеток сети УРАН на территории Украины

Поэтому новые декаметровые интерферометры, сооруженные вслед за УРАН-1 с разными базами и составляющие все вместе систему УРАН, были рассчитаны на измерения с предельным угловым разрешением порядка 1 угловой секунды.

Система УРАН состоит из пяти антенных систем, размещенных на территории Украины. Кроме антенны “Север-Юг” радиотелескопа УТР-2 в ней используются еще четыре специальные антенны: УРАН-1, УРАН-2, УРАН-3 и УРАН-4. В сооружении этой системы участвовали четыре научные организации НАН Украины: Харьковский Радиоастрономический институт, Одесский отдел Главной астрономической обсерватории, Львовский физико-механический институт им. Г. В. Карпенко и Полтавская гравиметрическая обсерватория Института геофизики им. С. И. Субботина. Антенна УРАН-2 находится в селе Степановка Полтавской области на удалении 152,3 км от УТР-2, антенна УРАН-3 размещена в районе г. Шацка Волынской области на удалении 946,2 км от УТР-2, антенна УРАН-4 находится в районе поселка Беляевка Одесской области на удалении 613,1 км от УТР-2. Схема размещения антенн УРАН на территории Украины приведена на рис. 1, а их географические координаты и расстояние от УТР-2 даны в таблице 1.

Для анализа заполнения UV-плоскости системой УРАН воспользуемся известными соотношениями для пространственных частот [9]

$$\begin{aligned}
 U_{ij} &= \cos \varphi_i \sin(T - l_i) - \cos \varphi_j \sin(T - l_j); \\
 V_{ij} &= -\sin \delta \cos \varphi_i \cos(T - l_i) + \cos \delta \sin \varphi_i + \\
 &+ \sin \delta \cos \varphi_j \cos(T - l_j) - \cos \delta \sin \varphi_j; \quad (1) \\
 U_{ij} &= -U_{ji}, \quad V_{ij} = -V_{ji},
 \end{aligned}$$

где U, V – рассчитываемые положения точки на UV-плоскости; i, j – номера антенн пары телескопов; φ_i и l_i – широта и долгота i -й антенны; δ – склонение источника; T – часовой угол источника (в качестве опорного используется часовой угол антенны УРАН-1).

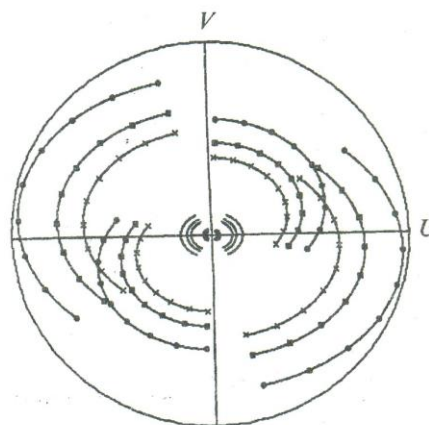


Рис. 2. Заполнение UV-плоскости интерферометрами УРАН при одновременном приеме на частотах 16,7 (X), 20 (□) и 25 МГц (●) излучения радиоисточника со склонением $\delta=49^\circ$

Пример треков на UV-плоскости приведен на рис. 2. При расчете предполагалось, что все интерферометры УРАН работают на частотах 16,7; 20 и 25 МГц и перекрывают диапазон часовых углов ± 4 часа, а источник имеет склонение $\delta=49^\circ$, т. е. проходит через зенит УТР-2. Рисунок выполнен в таком масштабе, что проведенная на нем полуокружность соответствует проекции базы, равной $80\,000\lambda$. Кроме того, следует иметь в виду, что не все инструменты системы УРАН имеют равные эффективные площади, и, очевидно, объекты малой интенсивности будут доступны не для всех пар интерферометров. В случае, проиллюстрированном на рис. 2, предполагалось, что только УТР-2 достаточно велик и только он образует пары с остальными инструментами. Отметки на кривых расположены с интервалом 1^h и, чтобы не затемнять рисунок, на малых радиусах не показаны.

Таблица 1.

Радиотелескоп	Географическая широта	Географическая дол- гота	Расстояние до УТР-2, км
УТР-2 (плечо С-Ю)	49° 38' 40" с. ш.	36° 56' 30" в. д.	—
УРАН-1	49° 39' 50" с. ш.	36° 21' 20" в. д.	42,3
УРАН-2	49° 37' 57" с. ш.	34° 49' 36" в. д.	152,3
УРАН-3	51° 28' 32" с. ш.	23° 49' 33" в. д.	946,2
УРАН-4	46° 23' 51" с. ш.	30° 16' 24" в. д.	613,1

Таблица 2.

N п/п	Кол-во больших телескопов	Частоты, МГц	Размер ДН, угл. сек.		Максимальный боковой лепесток	Рисунок
			С-Ю	З-В		
1	1	25	2,32	3,97	0,35	а
2	1	20; 25	2,52	3,97	0,266	—
3	1	16,7; 20; 25	2,69	4,08	0,178	—
4	2	25	2,52	3,97	0,29	—
5	2	20; 25	2,69	4,04	0,197	б
6	2	16,7; 20; 25	2,84	4,02	0,138	—
7	все	25	2,63	3,69	0,271	—
8	все	20; 25	2,80	3,73	0,191	—
9	все	16,7; 20; 25	2,95	3,73	0,132	в

Диаграмму направленности (аппаратную функцию) синтезированной системы несложно получить как двумерное преобразование Фурье от UV -плоскости, разбив последнюю на ячейки и считая, что если хотя бы один трек попадает в эту ячейку, то в ней записана 1, а в остальных ячейках содержится 0.

Основные параметры системы УРАН, как единого инструмента в различных вариантах работы, приведены в таблице 2. В расчете использовалось разбиение UV -плоскости на сетку 32×32 элемента разложения.

Строки в этой таблице соответствуют:

– “количество больших телескопов” – количество телескопов, способных создавать пары с другими инструментами УРАН (1 – только УТР-2, 2 – УТР-2 и УРАН-2);

– “частоты” – количество частот одновременно участвующих в заполнении UV -плоскости. Такой прием предполагает неизменность распределения яркости от частоты и применим далеко не всегда;

– “размер ДН” – полная ширина диаграммы направленности по нулевому уровню;

– “максимальный боковой лепесток” – отношение уровня максимального бокового лепестка к максимуму диаграммы.

На рис. 3 приведена форма синтезированной диаграммы направленности для трех из перечис-

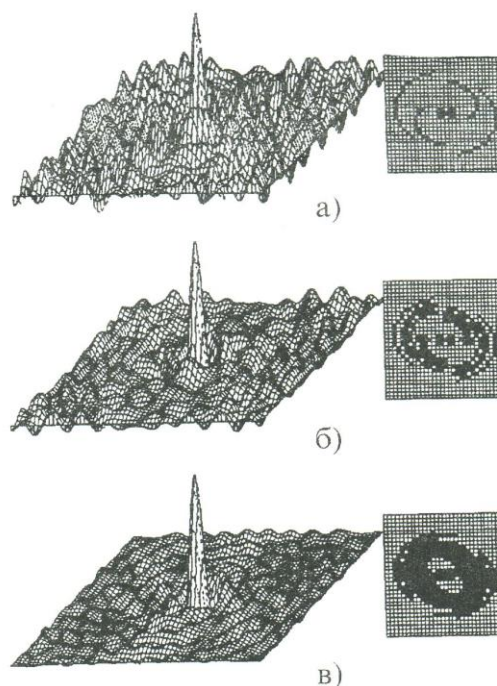


Рис. 3. Примеры синтезированных диаграмм системы УРАН для случаев, приведенных в таблице 2

ленных в таблице 2 случаев (справа – заполнение ячеек UV -плоскости).

Следует иметь в виду, что в настоящее время из-за особенностей декаметрового диапазона еще не удается использовать информацию о фазах пространственных гармоник и анализ структуры источников ведется с использованием модельных методов. Однако приведенный анализ тем не менее позволяет показать потенциальные возможности системы, а авторы надеются, что в будущем удастся выполнять и фазовые измерения.

Принципы построения антенн системы УРАН

Антенны декаметрового диапазона, с достаточной для радиоастрономических измерений эффективной площадью, обычно выполняют в виде эквидистантных антенных решеток, состоящих из большого числа идентичных слабонаправленных излучателей. Из-за больших размеров антенн механические методы наведения таких инструментов неприемлемы, и поэтому управление лучом всех радиотелескопов УРАН по двум угловым координатам ведется чисто электрическим способом путем фазирования высокочастотных токов излучателей двумя системами фазирования в каждом из них.

В антенной технике для электрического управления диаграммой направленности широко распространены фазовый метод, при котором для сдвига направления максимума диаграммы направленности фазы высокочастотных токов излучателей изменяют в пределах от 0 до 2π . В этом случае фазовый сдвиг $\Delta\varphi_d$, вводимый для фазирования сигналов излучателей, разнесенных на расстояние d , равен

$$\Delta\varphi_d = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\alpha - 2\pi n, \quad (2)$$

где λ – длина волны; α – угол между линией, соединяющей центры излучателей, и направлением максимума диаграммы направленности; $n=1,2,3\dots$. Этот способ отличается технической простотой, так как фазирование любой антенны независимо от ее величины может проводиться ограниченным числом однотипных фазовращателей, обеспечивающих фазовые сдвиги от 0 до π . Однако из-за различной зависимости фазовых сдвигов $\Delta\varphi_d$ от длины волны λ при разных d , фазовый метод является существенно узкополосным и при изменении λ должны соответственно изменяться все фазовые сдвиги системы управления лучом. В результате антенной с такой системой фазирования невозможно вести прием в широкой

полосе частот или одновременно на ряде далеко разнесенных частот при наблюдении излучающего объекта.

В антеннах системы УРАН, предназначенных для работы в широком диапазоне частот, использован другой способ электрического фазирования, при котором для широкополосного фазирования применяются линии с временем задержки τ_d . При $\alpha \neq \pi/2$ эти линии включаются в тракты фазированной антенной решетки у тех излучателей, в которых есть опережение сигналов при произвольном направлении приема волны, для того, чтобы компенсировать это опережение.

$$\tau_d = \frac{d}{c} \cos\alpha, \quad (3)$$

где c – скорость света. Если рассматривать отрезок линии с временной задержкой τ_d как фазовращатель, создающий сдвиг фаз $\Delta\varphi_d = \omega\tau_d$, $\omega = 2\pi\nu$ (ν – частота), то

$$\omega\tau_d = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\alpha. \quad (4)$$

Из (4) следует, что при применении линии временной задержки воспроизводится полный фазовый сдвиг, возникающий вследствие запаздывания между сигналами излучателей антенной системы. При этом дисперсия фаз фазовращателей такого типа независимо от d и α одинаковая и соответствует запаздыванию сигнала в свободном пространстве ($\Delta\varphi_d \sim \lambda^{-1}$). Следует, однако, отметить, что применение временного способа электрического управления лучом связано с созданием систем фазирования повышенной сложности из-за неидентичности управляющих устройств для разных d и увеличения потерь в высокочастотных трактах, особенно в антеннах с большими линейными размерами.

Таким образом, с одной стороны, создание остронаправленных широкополосных декаметровых антенн с электрическим управлением лучом, удовлетворяющих основным требованиям, предъявляемым к радиотелескопам системы УРАН, возможно лишь при условии применения временных систем фазирования. С другой стороны, использование временных систем фазирования при сохранении принципов построения антенн, разработанных для фазовых систем, приводит к значительным техническим трудностям. В этом случае требуется очень большое количество кабеля задержки для фазирования, множество коммутирующих устройств, резко падает коэффициент полезного действия и ошибки в системе фазирова-

ния могут достигать недопустимой величины. По этой причине многие зарубежные радиотелескопы с электрическим управлением лучом [10-15] использовали не временной, а фазовый способ управления и поэтому являлись узкополосными, практически работающими на одной волне меридиональными инструментами с управлением лучом только по одной координате (склонению). Смена ориентировки их луча проводилась, как правило, инерционными способами. Кроме того, в таких антеннах программы управления рабочей частотой приема и положением луча в пространстве оказывались взаимосвязанными.

Поэтому для создания широкополосных высоконаправленных антенных систем, способных проводить быстрый поиск и слежение за космическими радиоисточниками в широком секторе углов при независимости программ выбора частоты приема и направления ориентировки луча необходима была разработка новых принципов построения антенн, отличных от применяемых в известных антенных системах. В разработку этих принципов, впервые использованных при сооружении радиотелескопов УТР-1 и УТР-2 [16-29], большой вклад внесли сотрудники Радиоастрономического института Национальной Академии наук Л. Г. Содин, Ю. М. Брук, В. П. Бовкун, Л. Л. Базелян, П. А. Мельяновский и другие. При этом были сформулированы следующие основные требования, которым должны были удовлетворять также антенные системы радиointерферометров УРАН:

1. Широкополосность, т. е. способность работать в широком диапазоне частот при $V_{\max}/V_{\min} \geq 2$.
2. Высокая направленность и чувствительность.
3. Быстрая смена направления ориентировки луча по заданной программе.
4. Независимость программ управления ориентировкой луча и выбора частоты приема.
5. Эталонность всех основных характеристик антенны – коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента полезного действия (КПД), уровня боковых лепестков и т. д.
6. Максимально возможная помехоустойчивость по отношению к разным помехам и шумам.
7. Высокая надежность, техническая простота и экономическая рентабельность сооружений.

Учитывая приведенное, для радиointерферометров УРАН необходимы были антенные системы, оптимальные для использования в декаметровом диапазоне волн. Такая оптимизация прежде всего потребовала отказа от непрерывного способа перемещения луча в пространстве. Поэтому в антеннах интерферометров УРАН, как и в радиотелескопе УТР-2, были применены только дискретные схемы сканирования, обеспечивающие минимальную избыточность числа управляющих

элементов. Такие схемы естественно согласуются со свойствами антенны как фильтра пространственных частот, имеющего конечную полосу пропускания. Кроме того, неизбежное наличие случайных ошибок амплитудно-фазового распределения токов на антенне из-за неточности изготовления различных ее элементов и некоторого рассогласования в высокочастотных цепях также делает избыточным непрерывное движение луча. При создании широкополосных антенн следует отказаться от простого и вследствие этого широко применяемого в антенной технике способа последовательного питания излучателей в антенной решетке для ее фазирования в пользу параллельного способа, когда каждый излучатель получает питание с выхода антенны по идентичной цепи независимо от остальных излучателей.

Оптимизация системы фазирования временно-го типа с точки зрения уменьшения числа коммутируемых элементов может быть достигнута за счет использования дискретно коммутируемых линий временной задержки, построенных по оптимальному двоичному принципу [24]. Это позволяет при наличии всего m ячеек (коммутируемых разрядов) в каждой линии иметь 2^m дискретных значений временной задержки. Кроме того, большие возможности дает оптимальное построение схемы фазирования и суммирования сигналов. Анализ показал, что наиболее оптимальными являются многоэтажные ("елочные") схемы построения антенны, когда в каждом отдельном блоке фазирования фазировуются и суммируются сигналы небольшого числа (от 2 до 6) излучателей или групп излучателей. Для иллюстрации на рис. 4 приведены три блок-схемы фазирования и суммирования сигналов простейшей линейной антенной решетки, состоящей из 8 или 9 излучателей, отмеченных кружками. На рис. 4,а приведена неоптимальная схема одноэтажного фазирования и суммирования сигналов, а на рис. 4,б и 4,в – оптимальные 3-этажная и 2-этажная схемы при фазировании и суммировании сигналов в группе по 2 и 3 соответственно. В одноэтажной параллельной схеме (рис. 4,а) между каждым излучателем и точкой суммирования сигналов (выходом антенны) включена отдельная дискретноуправляемая линия временной задержки. Поскольку задержки во всех линиях при смене ориентировки луча при приеме электромагнитной волны с плоским фронтом должны изменяться пропорционально, надо в каждой линии, чтобы не искажалась диаграмма направленности, создать линейное распределение высокочастотных фаз, для чего необходимо сделать одинаковое число значений временной задержки. Поскольку в трактах разных излучателей должна использоваться разная длина линий, при одинаковом числе положений временной задержки это приводит к тому, что дискретность задержки в трактах многих излучателей окажется неоп-

равданно малой, а система фазирования – неоправданно сложной. Кроме того, общая длина высокочастотных коммуникаций, соединяющих излучатели с системой фазирования, в этом случае оказывается очень большой, так как каждый высокочастотный тракт длиной $L/2$ (L – длина решетки) используется однократно для питания только одного излучателя.

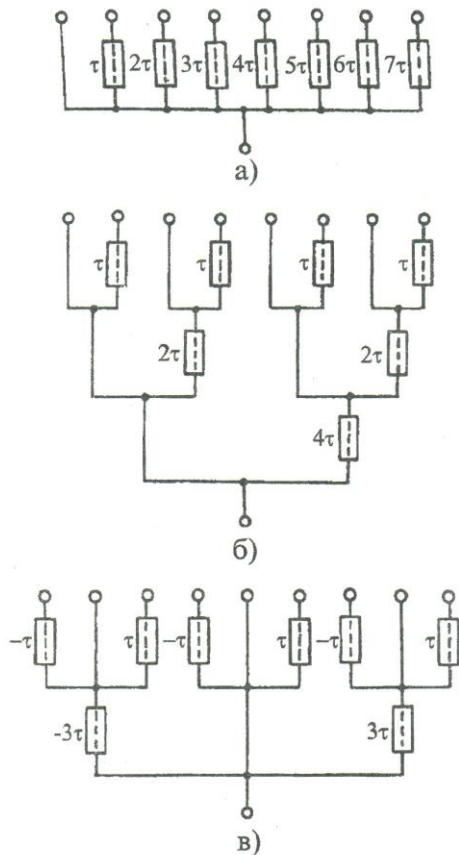


Рис. 4. Варианты этажно-параллельной системы фазирования

Этого недостатка лишены многоступенчатые схемы. На рис. 4,б и 4,в приведены схемы такой оптимальной многоступенчатой (“елочной”) структуры, где парциальные диаграммы направленности (“множители этажей”) управляются идентичными в данном этапе фазовращателями. Все этажи схемы антенны состоят из фазовращателей, объединяющих по два или по три фазуемых сигнала каждый. Антенная решетка любых размеров, содержащая много излучателей, будет состоять из большого числа этажей, в каждом из которых будет фазироваться и суммироваться по несколько

сигналов, поступающих с предыдущего этапа фазирования, причем число таких фазовращателей в каждом этапе определяется размерами антенны. С ростом номера этажа (считая от антенной решетки) число фазовращателей будет естественно уменьшаться, вплоть до последнего этажа, где будет находиться лишь один фазовращатель, сигнал на выходе которого соответствует результирующей диаграмме направленности антенны. Поскольку расстояние между точками фазирования изменяется при переходе от этажа к этажу в несколько раз, естественно иметь число значений временной задержки (а значит и число коммутируемых ячеек линии) в каждом этапе фазирования разное – тем большее, чем больше расстояние между точками, объединяемыми фазовращателями данного этажа. При этом все этажи фазироваться по-разному, и их линии задержки коммутируются не одновременно. Это асинхронный способ фазирования, дающий в случае больших антенн существенную экономию коммутируемых линий задержки [18]. Эта экономия связана с тем, что наиболее сложный выходной фазовращатель антенны, содержащий m коммутируемых временных задержек при 2^m положений луча остронаправленной результирующей диаграммы направленности антенны, только один. С уменьшением номера этажа число фазовращателей увеличивается, но схема их упрощается, и так до 1-го этажа, где используется наибольшее число фазовращателей N/n (N – общее число излучателей, n – число фазуемых в каждом фазовращателе сигналов), но очень простой конструкции. При многоступенчатой асинхронной схеме взаимная фазировка диаграммы (множителей) различных этажей производится так, чтобы при любом положении луча фазовые ошибки из-за асинхронности управления были минимальными.

В относительно небольших антеннах, где экономия, обеспечиваемая асинхронным способом фазирования, не столь существенна, может применяться синхронный метод фазирования многоступенчатой схемы антенны. При этом фазовращатели всех этажей фазирования имеют одинаковое число переключаемых линий задержки и различаются только по величине временных задержек, определяемых расстояниями между точками фазирования сигналов. При этом диаграммы направленности (множители) всех этажей ориентируются вдоль одного и того же выбранного направления в пространстве.

При многоступенчатых схемах фазирования экономится также большая часть общей длины высокочастотных трактов (коммуникаций) антенны, так как кроме самых коротких коммуникаций, соединяющих вибраторы антенной решетки с фазовращателями 1-го этажа, все остальные высокочастотные тракты используются многократно,

особенно наиболее длинные коммуникации последних этапов фазирования.

Из сопоставления описанных оптимальных схем с управляемыми чисто фазовым методом антеннами следует, как показано в [29], что оптимальная временная система требует всего в $1 + 0,8/n$ (где 2^n – число дискретных положений фазы в фазовращателе фазовой системы) больше коммутирующих элементов. Обычно $n=4$, при этом усложнение временной системы сравнительно с фазовой не превышает 20%. Столь близкое совпадение по технической сложности оптимальных временных систем управления лучом с фазовыми объясняется тем, что при рассмотренном способе построения временных систем фазирования основное количество управляющих элементов сосредоточено в аппаратуре фазирования первых этапов. При обычных значениях d/λ (d – расстояние между соседними излучателями решетки) максимальные изменения фазы в этих этапах заключены в пределах порядка $\pm\pi$, как и в случае фазовых систем. Возрастание же временных задержек и, следовательно, количества управляющих элементов в фазовращателях последующих этапов не сказывается существенно на общем числе управляющих элементов из-за сравнительно небольшого числа этих фазовращателей.

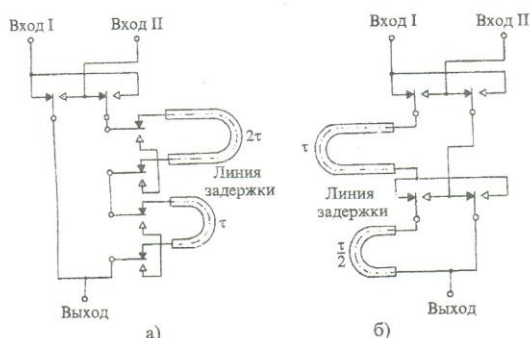


Рис. 5. Схемы фазовращателя с перемещающимся (а) и фиксированным (б) фазовым центром

Во временных системах фазирования могут использоваться устройства фазирования двух типов – с перемещающимся или фиксированным фазовым центром. Примером фазовращателя 1-го типа с двумя разрядами является устройство, приведенное на рис. 5,а, обеспечивающее фазирование двух сигналов по схеме рис. 4,б при (2^2-1) значениях временных задержек. В таких фазовращателях линии задержки, изменяющиеся по τ от нуля до максимума, включаются в цепи одного из фазированных сигналов, определяемого положением

квадрантного (верхнего) переключателя. Этот переключатель при смене направления приема относительно главного направления, перпендикулярного к оси линейной антенны, переключает все временные задержки в высокочастотный тракт другого сигнала. В результате фазовый центр находится либо на одном, либо на другом краю антенны в зависимости от положения квадрантного переключателя. Это создает определенные трудности при совместной работе нескольких антенн во время радиоинтерферометрических наблюдений, требуя принятия дополнительных мер для перевода фазового центра антенн к их геометрическому центру. Кроме того, при таком фазировании при отклонении луча от главного направления (нормали к решетке) сигналы в тех каналах, в которых включены линии задержки, уменьшаются из-за потерь в них. Это ведет к экспоненциальному падению амплитуд высокочастотных токов по длине антенны и вследствие этого к одновременному падению КНД и КПД при отклонении луча от нормали.

Другой вариант фазирования двух сигналов показан на рис. 5,б. В этом случае между двумя фазированными входами всегда включена полная (результатирующая) временная задержка, и при фазировании меняется лишь соотношение задержек между каналами. При этом фаза результирующего (суммарного) сигнала двух каналов неизменна, т. е. фазовый центр системы зафиксирован. Преимуществом фазовращателей такого типа является сравнительное постоянство коэффициента усиления (КУ) антенн при различной ориентировке луча вследствие противоположного характера изменения КПД и КНД. Так, при отклонении луча от нормали КНД, как и в предыдущем случае, уменьшается, однако КПД при этом растет, и их произведение (КУ) изменяется относительно слабо. Отметим, что применение таких фазовращателей с фиксированным фазовым центром с квадрантными переключателями в качестве переключающих временные задержки устройств дает существенную экономию числа коммутирующих элементов, в особенности при использовании их в оптимальной многоэтажной троичной схеме фазирования (рис. 4,в).

Для реализации высокой точности электрического управления лучом антенны необходимо обеспечить хорошее согласование во всех трактах системы фазирования и суммирования высокочастотных сигналов [21]. При этом суммирование сигналов различных каналов во всех фазовращателях антенны должно выполняться с максимальным устранением взаимного влияния между соединяемыми каналами. В противном случае отраженные сигналы из-за неточного согласования в высокочастотных цепях одних излучателей попадут в тракты других, и в результате возникнут большие ошибки в распределениях фаз и ампли-

туд высокочастотных токов по апертуре антенны. Для развязанного суммирования сигналов в высокочастотных цепях антенн УРАН во всех фазовращателях использовались широкополосные гибридные схемы суммирования на миниатюрных ферритовых тороидальных сердечниках, обеспечивающие развязки между объединяемыми каналами не менее 30÷40 дБ при потерях не более 0,1÷0,2 дБ [23]. Кроме того, во всех фазовращателях обеспечивалось постоянное входное и выходное сопротивление 75 Ом, равное волновому сопротивлению высокочастотных трактов антенны. С этой целью применялись высокочастотные широкополосные согласующие автотрансформаторы, также выполненные на миниатюрных ферритовых сердечниках.

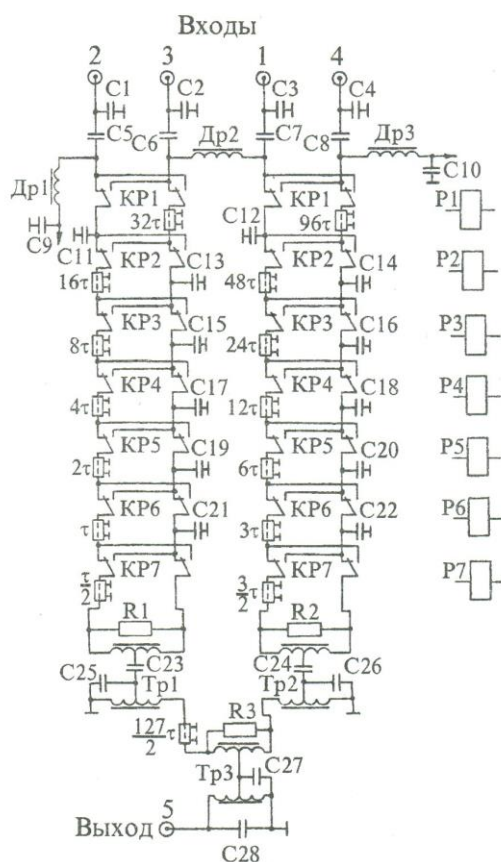


Рис. 6. Схема фазовращателя ФВ4-7-1

Для иллюстрации описанных принципов на рис. 6 приведена схема одного типового устройства временного управления лучом ФВ4-7, используемого в антенных системах УРАН. Этот блок предназначен для фазирования 4-х высокочастот-

ных сигналов и состоит из 7-ми ячеек (разрядов) переключаемой линии временной задержки. В качестве элементов, обеспечивающих задержку сигналов во времени, используются отрезки высокочастотного коаксиального кабеля, в качестве коммутаторов применены высокочастотные реле типа РЭС-8, причем в каждом разряде используется одно реле. Фазирование и суммирование сигналов проводится попарно – 1-го и 4-го каналов и 2-го и 3-го, после чего сигналы пар, просуммированные в гибридных сумматорах ТР1 и ТР2, в которые входят также согласующие автотрансформаторы, фазировются с помощью фиксированной линии задержки для совмещения их фазовых центров и суммируются еще одной гибридной схемой ТР3. После дополнительного согласования с помощью ферритового автотрансформатора результирующий сигнал подается на выход блока. Для устранения внутренних отражений распределенные индуктивности и емкости контактной системы реле и соединительных цепей согласуются с волновым сопротивлением тракта 75 Ом дополнительными емкостями $C_1 - C_4$, $C_{11} - C_{22}$ и $C_{25} - C_{28}$. Для контроля исправности высокочастотного тракта и уменьшения контактных сопротивлений реле через все линии пропускается постоянный ток, поступающий через высокочастотные дроссели Др. 1, Др. 2 и Др. 3.

Для антенн радиоинтерферометров УРАН были разработаны дискретно-двоичные линии задержки и фазовращатели с числом двоичных разрядов в одном устройстве от 4 до 7, работающие в диапазоне частот от 10 до 30 МГц на высокочастотных электромагнитных реле с коэффициентом стоячей волны КСВН не более 1,1÷1,15 и со среднеквадратичной фазовой ошибкой примерно 1÷2° на один разряд линии задержки. В качестве временных задержек во всех фазовращателях для повышения точности использовались высокочастотные коаксиальные кабели типа РК75-9-13. В декаметровом диапазоне при очень хорошем согласовании неидеальность высокочастотного кабеля в качестве линии временной задержки проявляется лишь в очень слабой частотной (на низких частотах) и температурной зависимости порядка 10^{-4} на 1°С. Это может приводить лишь к незначительному, по сравнению с шириной луча, изменению его ориентации в пространстве.

Существенным достоинством описанных фазовращателей является простота системы управления ими. Как следует из приведенного, учитывая дискретно-двоичный принцип изменения временной задержки, управление любым фазовращателем и всей системой фазирования антенны сводится к набору на пульте управления в двоичном коде соответствующего порядкового номера луча. Это обеспечивает такую комбинацию включенных

и выключенных линий задержки, которая соответствует записи с данной дискретностью нормированного значения так называемых “направляющих косинусов” l_0 и m_0 . Во всех антеннах УРАН перемещение луча в пространстве производится путем изменения l_0 и m_0 :

$$l_0 = \cos \varepsilon_0 \sin A_0, \quad m_0 = \cos \varepsilon_0 \cos A_0, \quad (5)$$

где l_0 и m_0 – косинус угла между направлением приема и линией параллели и меридиана соответственно; ε_0 – угол места; A_0 – азимут, отсчитываемый относительно направления на юг. При этом фазовращатели типа, показанного на рис. 5,а, управляются в обычном двоичном коде, на рис. 5,б – в двоичном коде Грея.

Антенны радиоинтерферометров УРАН

Указанные принципы построения временных систем управления лучом были использованы как ранее при разработке антенны “Север-Юг” радиотелескопа УТР-2 [7], так и при сооружении всех антенн радиоинтерферометров УРАН. Рассмотрим схемы этих антенн.

Антенна “Север-Юг”

Антенна “Север-Юг” УТР-2 с размерами 1788 м вдоль меридиана и 53 м вдоль параллели представляет собой горизонтальную эллиптическую антенную решетку, состоящую из 1440 идентичных излучателей [7]. Она состоит из 6 ориентированных вдоль меридиана параллельных рядов (по 240 вибраторов в ряду) с расстояниями между ближайшими вибраторами вдоль меридиана $d_1 = 7,5$ м и вдоль параллели $d_2 = 9$ м, причем для ограничения уровня дифракционных лепестков диаграммы направленности

$$d_1 |m|_{\max} = d_2 |l|_{\max} = 0,5 \lambda_{cp}$$

($|m|_{\max} = 1$; $|l|_{\max} = d_1/d_2 = 0,83$; λ_{cp} – средняя рабочая длина волны). В этой антенне были применены симметричные широкополосные горизонтальные излучатели шунтового типа, ориентированные вдоль параллели. Каждый из них состоит из двух проволочных цилиндров, переходящих в конусы на краях. Диаметр каждого вибратора 1,8 м, общая длина – 8 м. Вибраторы установлены на индивидуальных вертикальных металлических мачтах на высоте 3,5 м от земли с использованием для крепления несущей горизонтальной оси вибраторов высокочастотных шунтов (“металлических изоляторов”). В центре каждого вибратора установлено широкополосное симметрирующее устройство для перехода от симметричной входной цепи вибраторов к коаксиальному высо-

кочастотному кабелю с волновым сопротивлением 75 Ом, и здесь же включен реактивный четырехполюсник для широкополосного согласования комплексных входных сопротивлений излучателей с фидером. Для синтеза согласующих устройств были измерены входные сопротивления вибраторов при работе в антенной решетке при различных l_0 и m_0 и разработаны схемы устройства, которые снизили потери из-за рассогласования до 2+9 % в заданном секторе обзора на частотах от 10 до 25 МГц.

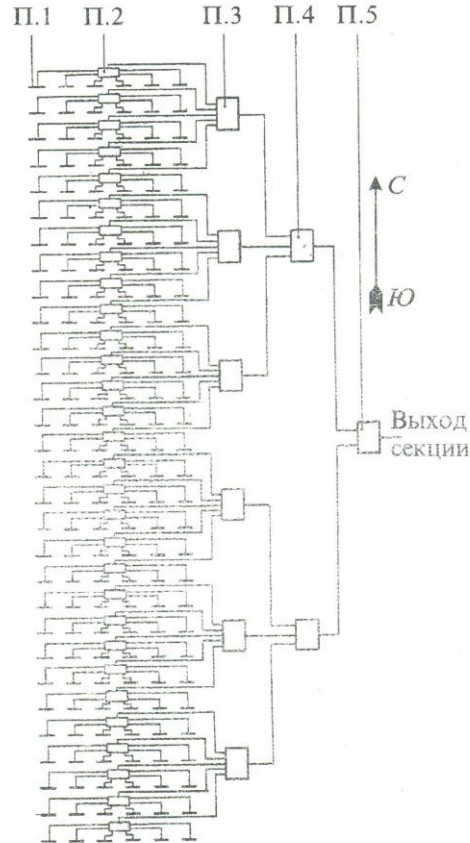


Рис. 7. Блок-схема одной секции антенны “Север-Юг”: П.1 – 180 излучателей, П.2 – 30 фазовращателей ФВ6-4, П.3 – 6 фазовращателей ФВ5-5, П.4 – 2 фазовращателя ФВ3-7, П.5 – фазовращатель ФВ2-8

В этой антенне применена описанная выше временная система фазирования с независимым управлением лучом по двум координатам l и m . Вся система фазирования разбита на 8 идентичных секций, каждая из которых обеспечивает фазирование и суммирование сигналов 180 излучателей. Блок-схема фазирования одной из таких

секций приведена на рис. 7, она состоит из 39 фазовращателей с дискретно переключаемыми кабельными линиями задержки. При фазировании антенной решетки по двум угловым координатам оптимальным является способ фазирования вначале слабонаправленного множителя диаграммы направленности и затем – высоконаправленного. Поэтому в этой антенне вначале ведется фазирование по l (множителю вдоль ее короткой стороны) с помощью 30 идентичных фазовращателей ФВ6-4 – одноэтажных синхронных фазовращателей, каждый из которых фазировает и суммирует 6 высокочастотных сигналов, обеспечивая 2^4 дискретных положений временной задержки в секторе по $l = \pm 0,833$.

Дальнейшее фазирование и суммирование сигналов по второй угловой координате проводится асинхронной многоступенчатой схемой с помощью 6 фазовращателей ФВ5-5, 2 фазовращателей ФВ3-7 и 1 фазовращателя ФВ2-8, обеспечивающих фазирование и суммирование вначале по 5 сигналов на первом этаже, по 3 – на втором этаже и по 2 – на третьем этаже при 2^5 , 2^7 и 2^8 положений временной задержки соответственно ± 1 по m . На выходе последнего фазовращателя ФВ2-8 выделяется результирующий сигнал секции, соответствующий диаграмме направленности антенной решетки, состоящей из 180 излучателей. Все указанные фазовращатели собраны по схеме с фиксированным фазовым центром. Окончательное фазирование сигналов 8 секций ведется с помощью выходного фазовращателя антенны ФВ8-11, обеспечивающего 2^{11} положений временной задержки.

Для компенсации потерь в системах фазирования секций этой антенны и в фазовращателе ФВ8-11 на выходе всех 8 секций и на 8 выходах фазовращателя ФВ8-11 включены два яруса одинаковых антенных усилителей по 8 усилителей в каждом. На выходе каждого усилителя второго яруса включен гибридный разветвитель на 5 каналов, сигналы с выходов которых подаются на временную матричную схему, формирующую одновременно 5 развязанных высоконаправленных в плоскости меридиана лучей, разнесенных по склону примерно на полуширину диаграммы направленности (рис. 8). Управление всеми лучами проводится одновременно, при этом третий (центральный) луч ориентируется в направлении на наблюдаемый объект в условиях отсутствия рефракции радиоволн в ионосфере Земли. С этой целью цепи управления всеми одноименными рядами фазовращателей системы фазирования по l и отдельно по m (считая от старшего разряда) соединяются последовательно и управляются по l – 4-х разрядной системой и по m – 11-ти разрядной. При такой схеме процесс ориентировки центрального луча в заданном направлении заключа-

ется в наборе с помощью ЭВМ или вручную номера соответствующего направления по l в четырехзначном и по m в одиннадцатизначном двоичном коде Грея.

С целью сокращения длины высокочастотных коммуникаций все фазовращатели антенны установлены на антенном поле в специальных подземных тоннелях под антенной решеткой и управляются дистанционно с центрального пультa.

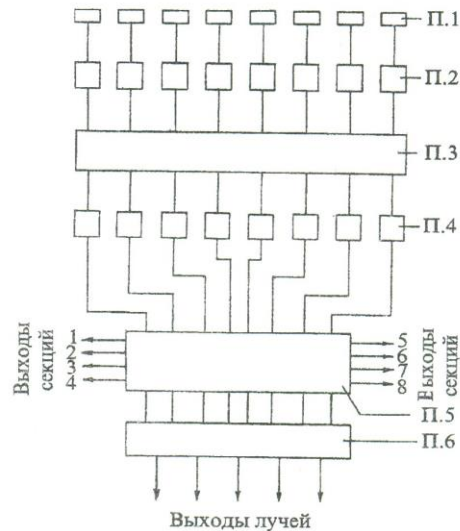


Рис. 8. Блок-схема формирования лучей антенны "Север-Юг":

П.1 – 8 секций антенны, П.2 – 8 антенных усилителей, П.3 – фазовращатель ФВ8-11, П.4 – 8 антенных усилителей II яруса, П.5 – блок формирования выходов антенны, П.6 – блок формирования 5-и лучей

Диаграмма направленности антенны "Север-Юг" по полю для центрального луча при одинаковых амплитудах высокочастотных токов излучателей и сигналов секций

$$f(l, m) = f_0(l) f_p(l, m) f_1(l) f_1(m) f_2(m) f_3(m) f_4(m), \quad (6)$$

где $f_0(l)$ – диаграмма направленности элементарного излучателя; $f_p(l, m)$ – множитель, учитывающий влияние поверхности раздела; $f_1(l)$ – множитель ряда из 6 коллинеарных излучателей, объединяемых фазовращателем ФВ6-4; $f_1(m)$, $f_2(m)$, $f_3(m)$, $f_4(m)$ – множители 5, 15, 30 и 240 параллельных рядов четырехэтажной системы фазирования по m .

Таблица 3.

Рабочий диапазон, МГц	10-25
Общее число излучателей	1440
Размеры, м	1788 x 53
Поляризация	линейная, горизонтальная
Максимальная эффективная площадь, м ²	107 000 (на частоте 10 МГц в зенит)
Ширина диаграммы направленности по мощности на максимальной частоте	27' x 20° по <i>m</i> и <i>l</i> соответственно
Максимальный КНД	8700 (на частоте 25 МГц в зенит)
Сектор обзора	±1 по <i>m</i> , ±0,833 по <i>l</i> (от -10° до +90° по склонению и более ±4 ^h по прямому восхождению)
Число положений луча	16 по <i>l</i> , 2048 по <i>m</i> (всего 32768)
Число лучей	5 лучей, разнесенных на полуширину диаграммы направленности на уровне 0,5 по мощности
Число антенных усилителей	8 – первого этажа усиления, 8 – второго этажа усиления
Общее число фазовращателей	240 по <i>l</i> , 73 по <i>m</i>

$$f_0(l) \cong \sqrt{1-l^2}, \quad (7)$$

$$f_p(l, m) \cong \sin \left[\frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{1-l^2-m^2} \right], \quad (8)$$

$$f_1(l) \cong \frac{\sin \left[\frac{6\pi d_2}{\lambda} (l-l_{1i}) \right]}{6 \sin \left[\frac{\pi d_2}{\lambda} (l-l_{1i}) \right]}, \quad (9)$$

$$f_1(m)f_2(m)f_3(m)f_4(m) \cong \frac{\sin \left[\frac{5\pi d_1}{\lambda} (m-m_{1i}) \right]}{5 \sin \left[\frac{\pi d_1}{\lambda} (m-m_{1i}) \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{15\pi d_1}{\lambda} (m-m_{2i}) \right]}{3 \sin \left[\frac{5\pi d_1}{\lambda} (m-m_{2i}) \right]} \times \frac{\sin \left[\frac{30\pi d_1}{\lambda} (m-m_{3i}) \right]}{2 \sin \left[\frac{15\pi d_1}{\lambda} (m-m_{3i}) \right]} \times \frac{\sum_{k=1}^4 A_k \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{900(k-1)+555}{\lambda} (m-m_{4i}) \right]}{\sum_{k=1}^4 A_k}, \quad (10)$$

где l_{ji} , m_{ji} – направление фазирования *j*-го этажа по *m* или *l* в *i*-ом направлении; *h* – высота положения вибраторов над земной поверхностью

(*h* = 3,5 м); *k* – номер пар секций, сигналы которых взаимофазированы на выходе антенны; A_k – их относительные амплитуды (*k*=1 соответствует 4-й и 5-й секциям, *k*=2 – 3-й и 6-й секциям и т. д.).

В (10) учтено, что расстояние между центрами четвертой и пятой секций на 52,5 м больше, чем между центрами остальных секций. Распределение амплитуд сигналов при этом считается симметричным относительно центра антенны.

Основные характеристики антенны “Север-Юг” приведены в таблице 3.

Антенны УРАН-1 [8], УРАН-2, УРАН-3, УРАН-4 [30]

Все эти антенны выполнены в виде многоэлементных эквидистантных антенных решеток с расстоянием $d_1=d_2=7,5$ м между соседними вибраторами и временным способом управления лучом по двум угловым координатам. Эти антенны содержат 128 (УРАН-1 и УРАН-4) и 256 (УРАН-2 и УРАН-3) широкополосных турникетных излучателей, размещенных в первых двух антеннах – в четырех, а в остальных – в восьми рядах, ориентированных вдоль параллели. Такое ортогональное по отношению к антенне “Север-Юг” расположение всех антенн УРАН обеспечивает высокую направленность в двух плоскостях результирующей диаграммы направленности по огибающей при интерферометрических наблюдениях, когда сигналы базового инструмента перемножаются с сигналами антенн УРАН.

Размеры первых двух антенн 238 м × 28 м и остальных двух 238 м × 58 м, а эффективные площади около 7000 м² и 14000 м² соответственно. Для устранения очень существенного в декаметровом диапазоне влияния на интерферо-

метрические наблюдения поворота плоскости поляризации линейно-поляризованных радиоволн в ионосфере Земли за счет эффекта Фарадея в антеннах УРАН, кроме антенны "Север-Юг", используются турникетные излучатели. Каждый из них состоит из двух взаимно ортогональных широкополосных горизонтальных вибраторов шунтового типа, установленных на индивидуальных железобетонных основаниях на высоте 3,5 м от поверхности земли. Оси всех вибраторов ориентированы под углом $\pm 45^\circ$ к линии меридиана. В центре каждого турникетного излучателя находятся два автономных широкополосных симметрирующих и согласующих устройства обеих линейных поляризаций для согласования входных импедансов излучателей с волновым сопротивлением высокочастотных коммуникаций. Общий вид антенной решетки УРАН-1 с земли приведен на рис. 9.

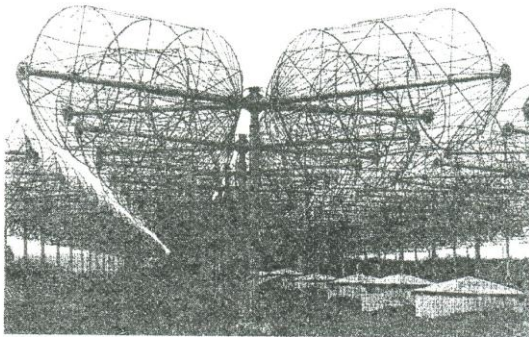


Рис. 9. Общий вид антенной решетки УРАН-1

Вибраторы каждой из линейных поляризаций имеют отдельные системы фазирования сигналов с общим управлением. Таким образом, каждая антенная решетка УРАН фактически представляет собой две совмещенные антенны для одновременного приема двух ортогональных (при приеме из зенитного направления) линейно-поляризованных волн с отдельными выходами. На рис. 10 приведена блок-схема управления лучом для одной из линейных поляризаций антенны УРАН-1 и УРАН-4. В каждой из этих антенн используются две такие идентичные многэтажные системы фазирования, построенные по двоичному принципу на фазовращателях временного типа с фиксированным фазовым центром, позволяющие дискретно управлять лучом по двум угловым координатам в секторе обзора $-1 \leq l \leq 1$ и $-1 \leq m \leq 1$. При этом в антенных системах УРАН, учитывая их относительно небольшие размеры, применен синхронный способ управления лучом.

Согласно рис. 10 вначале фазирование по m и суммирование сигналов ведется одноэтажной схе-

мой вдоль короткой стороны антенны с помощью 32 одинаковых фазовращателей ФВ4-4, обеспечивающих фазирование 4 высокочастотных сигналов при 2^4 положениях луча по угловой координате m . Затем фазирование по l и суммирование сигналов проводится вдоль длинной стороны антенны трехэтажной схемой, состоящей из восьми фазовращателей ФВ4-7-I (схема такого фазовращателя приведена на рис. 6), двух фазовращателей ФВ4-7-II и одного фазовращателя ФВ2-7, причем на первых двух этажах фазироваться и суммируются по четыре высокочастотных сигнала, а на третьем – по два. Все фазовращатели системы фазирования по l обеспечивают 2^7 положений луча в указанном выше секторе. Для компенсации потерь, возникающих в системе фазирования, используется одноэтажная система антенного усиления, состоящая для каждой из линейных поляризаций из одного антенного усилителя АУ-I на первом этаже, включаемого на выходе антенны.

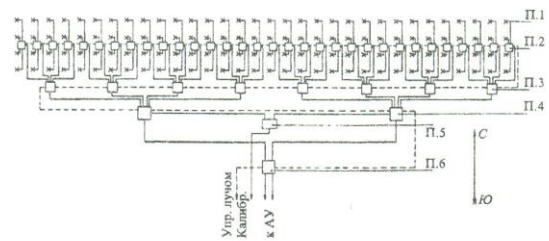


Рис. 10. Блок-схема антенных решеток УРАН-1 и УРАН-4 для одной из линейных поляризаций: П.1 – 128 турникетных излучателей, П.2 – 32 фазовращателя ФВ4-4, П.3 – 8 фазовращателей ФВ4-7-I, П.4 – 2 фазовращателя ФВ4-7-II, П.5 – устройство разделения сигнала при калибровке, П.6 – фазовращатель ФВ2-7

Для управления лучом используются две схемы: одна 4-разрядная, обеспечивающая управление по m и одна 7-разрядная, управляющая по l . Установка луча в заданном направлении, как и в антенне "Север-Юг", проводится путем набора номера луча в четырехзначном для m и в семиразрядном для l двоичном коде Грея с центрального пункта инструмента с помощью ЭВМ или вручную.

Диаграмма направленности антенн УРАН-1 и УРАН-4 по полю

$$f(l, m) = f_0(l, m) f_p(l, m) f_1(m) f_1(l) f_2(l) f_3(l), \quad (11)$$

где $f_0(l, m)$ – диаграмма направленности элементарного излучателя; $f_p(l, m)$ – множитель,

учитывающий влияние поверхности раздела; $f_1(m)$ – множитель ряда из 4 параллельных излучателей, объединяемых одним фазовращателем ФВ4-4; $f_1(l), f_2(l), f_3(l)$ – множители 4, 16 и 32 параллельных рядов трехэтажной системы фазирования по l .

$$f_0(l, m) \cong \sqrt{1 - \frac{1}{2}(l \pm m)^2}, \quad (12)$$

знак “+” относится к одной линейной поляризации, а “-” к другой,

$$f_p(l, m) \cong \sin \left[\frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{1 - l^2 - m^2} \right]. \quad (13)$$

При одинаковых токах излучателей

$$f_1(m) \cong \frac{\sin \left[\frac{4\pi d_1}{\lambda} (m - m_i) \right]}{4 \sin \left[\frac{\pi d_1}{\lambda} (m - m_i) \right]}, \quad (14)$$

$$f_1(l) f_2(l) f_3(l) \cong \frac{\sin \left[\frac{4\pi d_2}{\lambda} (l - l_i) \right]}{4 \sin \left[\frac{\pi d_2}{\lambda} (l - l_i) \right]} \times$$

$$\times \frac{\sin \left[\frac{16\pi d_2}{\lambda} (l - l_i) \right]}{4 \sin \left[\frac{4\pi d_2}{\lambda} (l - l_i) \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{32\pi d_2}{\lambda} (l - l_i) \right]}{2 \sin \left[\frac{16\pi d_2}{\lambda} (l - l_i) \right]}, \quad (15)$$

где l_i, m_i – направление фазирования по l или m в i -ом направлении; h – высота положения вибраторов над земной поверхностью ($h=3,5$ м); d_1, d_2 – расстояния между соседними вибраторами вдоль меридиана и параллели соответственно ($d_1=d_2=7,5$ м).

Блок-схема системы фазирования и суммирования высокочастотных сигналов в антеннах УРАН-2 и УРАН-3 для одной из линейных поляризаций приведена на рис. 11. В этих антеннах также вначале фазирование и суммирование сигналов проводится по m , вдоль короткой стороны антенн, с помощью 64 фазовращателей ФВ4-4. Затем фазирование проводится по второй угловой координате l , вдоль длинной стороны антенн, с

помощью 16 фазовращателей ФВ4-7-I и четырех фазовращателей 4-7-II. Затем каждая из четырех образовавшихся антенных решеток по 64 излучателя в каждой вновь фазировается попарно по m с помощью двух фазовращателей ФВ2-5, и на последнем этапе фазирование по l выполняется с помощью одного фазовращателя ФВ2-7. Таким образом, в этих антеннах схема фазирования по m – двухэтажная, а по l – трехэтажная. Усиление сигналов для компенсации потерь также ведется по двухэтажной схеме на выходе фазовращателей ФВ2-5 и на выходе ФВ2-7 (по два усилителя). Диаграммы направленности антенн УРАН-2 и УРАН-3 в плоскости, где обеспечивается высокая направленность, такие же, как у антенн УРАН-1 и УРАН-4, однако по второй координате m диаграммы направленности у этих антенн вдвое уже, чем в предыдущем случае. Управление лучом проводится идентично тому, как у антенн УРАН-1 и УРАН-4.

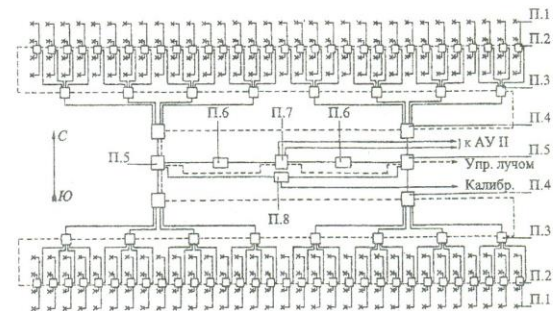


Рис. 11. Блок-схема антенных решеток УРАН-2 и УРАН-3 для одной из линейных поляризаций: П.1 – 256 турникетных излучателей, П.2 – 64 фазовращателя ФВ4-4, П.3 – 16 фазовращателей ФВ4-7-I, П.4 – 4 фазовращателя ФВ4-7-II, П.5 – 2 фазовращателя ФВ2-5, П.6 – 2 антенных усилителя I яруса, П.7 – фазовращатель ФВ2-7, П.8 – устройство разделения сигнала при калибровке

Следует отметить, что приведенные схемы всех антенн УРАН, также как и основного (базового) инструмента, предусматривают работу не только в режиме образования сфазированного суммарного сигнала на выходе антенн (режим интерферометра или так называемого компенсационного радиометра). Одновременно возможно также использование всех антенн и в других вариантах, в частности в режиме модуляционного приема, когда перемножаются сигналы с выходов половин антенн, разнесенных вдоль их длинной стороны. Заметим также, что дискретность управления диаграммами направленности всех антенн выбиралась таким образом, чтобы падение КНД по каждой из координат не превышало 1,5 %, а резуль-

тирующее – 3 % в худшем случае, соответствующем максимальной рабочей частоте 25 МГц. При этом диаграммы направленности антенн по полю

для соседних положений луча пересекаются вблизи уровня 0,99. Основные характеристики всех антенн УРАН приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Антенна	УРАН-1	УРАН-2	УРАН-3	УРАН-4
Рабочий диапазон	10-25 МГц			
Общее число излучателей	128	256	256	128
Размеры, м	238 × 28	238 × 58	238 × 58	238 × 28
Поляризация	две линейные или круговые			
Максимальная эффективная площадь (в зенит), м ²	~7000	~14000	~14000	~7000
Ширина диаграммы направленности (на частоте 25 МГц в зенит)	3,5° × 30°	3,5° × 15°	3,5° × 15°	3,5° × 30°
Максимальный КНД (на частоте 25 МГц в зенит)	600	1200	1200	600
Максимальное разрешение интерферометра (на частоте 25 МГц)	15"	4"	0,7"	1"
Сектор обзора	±1 по <i>l</i> , ±1 по <i>m</i>			
Число положений луча	128 - по <i>l</i> 16 - по <i>m</i> (всего 2048)	128 - по <i>l</i> 32 - по <i>m</i> (всего 4096)	128 - по <i>l</i> 32 - по <i>m</i> (всего 4096)	128 - по <i>l</i> 16 - по <i>m</i> (всего 2048)
Число антенных усилителей	2 — I этажа	2 — I этажа, 2 — II этажа	2 — I этажа, 2 — II этажа	2 — I этажа
Общее число фазовращателей	11 по <i>l</i> 32 по <i>m</i>	21 по <i>l</i> 66 по <i>m</i>	21 по <i>l</i> 66 по <i>m</i>	11 по <i>l</i> 32 по <i>m</i>

Декаметровые радиоинтерферометры УРАН

Радиоаппаратура всех пунктов радиоинтерферометров УРАН состоит из антенных усилителей, аппаратуры управления лучом, высокочувствительных приемных устройств (радиометров) с высокостабильными гетеродинами, корреляторов, систем записи информации, аппаратуры точного времени, а также градуировочной, измерительной и контрольной аппаратуры.

В соответствии с методикой интерферометрических наблюдений в декаметровом диапазоне волн [17], при которой кроме записи интерференционных сигналов необходимо одновременно измерять мощности принимаемых от исследуемого объекта сигналов на выходе каждой из антенн интерферометров, все антенные системы УРАН разделены на две равные части с антенными усилителями на выходе. Сигналы на выходе этих антенных усилителей разветвляются с помощью гибридных схем. Для интерферометрических измерений сигналы половин антенн суммируются, а для измерения мощности сигналы на выходе антенн перемножаются с помощью модуляционных радиометров с дискретной фазовой модуляцией 0-π.

Блок-схема радиоинтерферометра УРАН-1, предназначенного для наблюдений в реальном времени, изображена на рис. 12. Заметим, что в

первом пункте этого интерферометра около антенны “Север-Юг” используется два комплекта приведенной на рис. 12 аппаратуры (кроме антенны и радиорелейной линии) для одновременных наблюдений на двух разнесенных частотах. Во втором пункте УРАН-1 используется четыре комплекта приведенной на рис. 12 аппаратуры (кроме антенны и радиорелейной аппаратуры) для одновременного наблюдения сигналов двух линейных поляризаций на двух частотах.

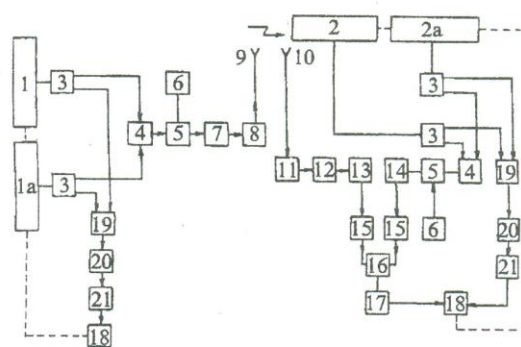


Рис. 12. Блок-схема интерферометра УРАН-1

На рис. 12 позиции 1 и 1а – северная и южная половины антенны “Север-Юг”, а 2 и 2а – западная и восточная половины антенны УРАН-1. Сигналы каждой половины антенны делятся гибридными разветвителями 3 на равные части (без ухудшения отношения сигнал/шум), после чего с одних выходов разветвителей они поступают на гибридный сумматор 4, а с других – на дискретный фазовый модулятор 19. Суммарный сигнал антенны “Север-Юг” после усиления и соответствующих преобразований в приемнике 5 с высокостабильным гетеродином 6, в котором применен рубидиевый стандарт частоты с синтезатором, поступает на радиорелейную аппаратуру – модулятор 7 радиопередатчика 8, подключенного к передающей антенне 9. Принятый в другом пункте интерферометра антенной 10 ретранслированный сигнал после усиления и преобразования в приемнике радиорелейной станции 11 поступает на усилитель низкой частоты 12 и через регулируемый аттенюатор 13 и полосовой фильтр 15 – на один из входов коррелятора 16. Суммарный сигнал каждой из линейных поляризаций антенны УРАН-1 с выхода приемника 5 подается на линию регулируемой временной задержки 14 и с выхода этой линии через полосовой фильтр 15 – на второй вход коррелятора 16. Выходной сигнал коррелятора через усилитель с фильтром интерференционных частот 17 подается на систему цифровой записи 18.

Измерения мощности сигналов на выходе обеих антенн проводятся модуляционными радиометрами с дискретной фазовой модуляцией. Эти радиометры состоят из фазовых модуляторов 19, радиоприемников 20, модуляционных выходных устройств 21 и системы записи 18.

Для исследования эффекта Фарадея и устранения его влияния на определение модуля функции видности (γ) наблюдаемого радиисточника измерения на радиоинтерферометрах УРАН ведутся одновременно для двух линейных поляризаций принимаемого антенной космического радиоизлучения. При этом результирующее значение γ определяется по двум его составляющим γ_1 и γ_2 для 1-ой и 2-ой линейных поляризаций [31]:

$$\gamma = \xi \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}, \quad (16)$$

где ξ – поправка, учитывающая, что линейные поляризации антенн УРАН ортогональны только при приеме из направления в зенит. Величина ξ зависит от зенитного расстояния источника и равна 1 при приеме из зенита [31].

Другой способ наблюдений на радиоинтерферометрах УРАН, при котором эффект Фарадея не

влияет на измерения, реализуется при работе антенны с турникетными излучателями в режиме приема сигналов с круговой поляризацией. Известно, что турникетный излучатель, расположенный в горизонтальной плоскости, излучает или принимает сигналы с круговой поляризацией при сдвиге фаз токов излучателей $\pm 90^\circ$ в направлении зенита, когда векторы линейно-поляризованных волн равны по модулю и ортогональны в пространстве. Однако при приеме из других направлений даже в плоскости симметрии (плоскости меридиана для всех антенн УРАН) эти условия нарушаются – не выполняется условие ортогональности линейно-поляризованных волн в пространстве. В общем случае, при передаче или приеме в произвольном направлении, эти волны не равны и по амплитуде. Создать вращающееся по кругу поле с помощью турникетного излучателя или антенной решетки из таких излучателей в произвольном направлении можно, если неортогональность линейно-поляризованных полей в пространстве скомпенсировать соответствующей неортогональностью высокочастотных токов излучателей по фазе (во времени). Для интерферометров УРАН разработана схема, с помощью которой можно принимать волны с правой и левой круговой поляризациями турникетным излучателем в направлениях, отличных от зенитного [8]. Сигналы одной из круговых поляризаций с одного из выходов этой схемы подаются на гибридные разветвители 3 (рис. 12). Все остальные радиосистемы интерферометров УРАН при этом работают так же, как и при приеме сигналов с линейной поляризацией. Естественно, что в этом случае в приемных пунктах УРАН для работы на каждой частоте используется только один комплект радиоприемной и радиометрической аппаратуры.

Заметим, что для одновременной работы на двух частотах между приемником 5 и модулятором радиорелейной станции 7 включен фильтровый блок частотного уплотнения, который объединяет два смежных частотных канала. Аналогичный блок для разделения ретранслированных сигналов в двух смежных полосах частот включен между приемником 11 и усилителем низких частот 12 (на рис. 12 не показаны).

Линия регулируемой временной задержки 14 обеспечивает точное совмещение во времени сигналов, подаваемых на коррелятор, до их перемножения, компенсируя время распространения ретранслированных сигналов и запаздывание сигналов, принятых в одном пункте, относительно другого

$$\tau = D \frac{1 \pm l_0}{c}, \quad (17)$$

где D – база интерферометра УРАН-1. Линия задержки четырехканальная (на две частоты и две поляризации), цифровая, с аналогово-цифровым и цифро-аналоговым преобразователями на входе и выходе. Преимуществом цифровой линии задержки по сравнению с аналоговой является ее стабильность и независимость коэффициента передачи от величины задержки.

Все остальные интерферометры УРАН, кроме УРАН-1, предназначены для работы в режиме радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ). Блок-схема аппаратуры этих интерферометров с независимой записью информации в каждом пункте (антенна “Север-Юг”, УРАН-2, УРАН-3, УРАН-4) приведена на рис. 13. Здесь 1 и 1а – две половины антенны, 2 – симметричные гибридные разветвители, 3 – гибридный симметричный сумматор, 4 – радиоприемное устройство с высокостабильным гетеродином 5. Сигналы с выхода приемника поступают на систему регистрации РСДБ, включающую в себя IBM-совместимые компьютеры типа АТ-386 6, видеоадаптер 7 и видеомagneтофон 8.

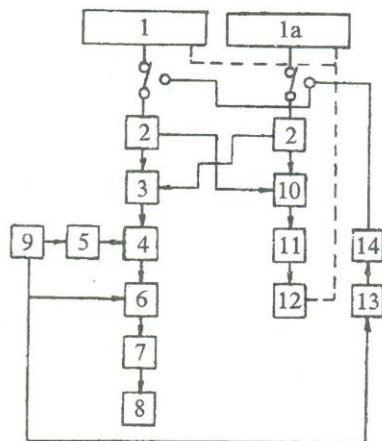


Рис. 13. Блок-схема интерферометров УРАН, работающих в режиме РСДБ

Сигналы с других выходов гибридных разветвителей 2 поступают на дискретный фазовый модулятор $0-\pi$ 10 и модуляционный радиометр 11, обеспечивающий измерение мощности наблюдаемых радиоисточников на выходе антенны. Низкочастотные сигналы на выходе радиометра регистрируются системой 12 на основе IBM совместимого компьютера, который одновременно, как и в интерферометре УРАН-1, обеспечивает управление лучом антенны по двум угловым координатам в соответствии с заданной программой. Градуировка интерференционных и модуляционных записей проводится с помощью генераторов высо-

костабильных шумовых и псевдошумовых сигналов 13 с калибровочными дискретно-переключаемыми аттенуаторами 14, сигналы с выходов которых подаются на входные цепи антенных усилителей I-го яруса антенн УРАН в режиме калибровки. Псевдошумовые генераторы, спектр сигналов которых близок к шумовому, синхронизируются сигналами схемы точного времени 9.

В качестве высокостабильных гетеродинов в схемах рис. 12 и рис. 13 применяются рубидиевые стандарты частоты с синтезаторами частоты, которые также используются в системах точного времени, синхронизируемых сигналами точного времени, передаваемыми по телевидению. В качестве приемных устройств во всех пунктах УРАН используются приемники с тремя преобразованиями частоты с переносом спектра усиливаемых сигналов к интервалу частот от 2 до 22 кГц.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность В. П. Бовкуну, А. Л. Бобейко, Ю. Ю. Сергиенко, М. И. Рябову и О. А. Литвиненко за участие в разработке и наблюдениях на радиоинтерферометрах УРАН-1 и УРАН-4. Авторы благодарны академикам НАН Украины Л. Н. Литвиненко, Я. С. Яцкиву и В. В. Панасюку за постоянный интерес и всестороннюю поддержку работ, связанных с сооружением системы УРАН. Следует также отметить, что создание этой системы было бы невозможно без постоянной поддержки, оказываемой работе Президиумом НАН Украины и в первую очередь Президентом НАН Украины Б. Е. Патеном.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ISF U 24000 (U24200), ESO C&EE A-01-053 и INTAS-94-4010.

Литература

1. G. W. Brown, T. D. Carr, W. F. Block. *Astrophys. Lett.* 1968, **1**, pp. 89-94.
2. G. A. Dulk. *Astrophys. J.* 1970, **159**, No. 2, pp. 671-684.
3. T. D. Carr, M. A. Lynck, M. P. Paul, G. W. Brown, J. May, N. F. Six, V. M. Robinson, W. F. Block. *Radio Sci.* 1970, **5**, pp. 1223-1226.
4. M. A. Lynch, T. D. Carr, V. M. Robinson, N. F. Six. *Astrophys. Lett.* 1972, **10**, pp. 153-158.
5. T. A. Clark, W. G. Erickson. *Proc. IEEE.* 1973, **61**, No. 9, pp. 1230-1233.
6. R. L. Mutel, J. J. Broderick, T. D. Carr, M. Lynch, M. Desch, W. W. Warnock, W. K. Klempere. *Astrophys. J.* 1974, **193**, pp. 279-284.
7. А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин, Ю. М. Брук, П. А. Мельяновский, Г. А. Инютин, Н. Ю. Гончаров. Сборник “Антенны” под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып. 26, с. 15-57.
8. А. Л. Бобейко, В. П. Бовкун, С. Я. Брауде, А. В. Мень, Ю. Ю. Сергиенко. Сборник “Антенны”

- под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып. 26, с. 121-134.
9. Р. Томпсон, Дж. Морган, Дж. Свенсон. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. Москва, Мир, 1989 г.
 10. W. C. Erickson. IEEE Trans: 1965, AP-13, No. 3, p. 422-427.
 11. J. A. Galt, C. H. Costain. Trans. of the Royal society of Canada. 1965, III, s. IV, pp. 1-12.
 12. J. A. Galt, C. R. Purton, P. A. G. Scheuer. Publ. dominion observatory. 1967, 25, No. 10.
 13. C. H. Costain, J. D. Lacey, R. S. Roger. IEEE Trans. on antennas and propagation. 1969, AP-17, No. 2, pp. 162-169.
 14. W. C. Erickson, J. R. Fisher. Radio Science. 1974, 9, No. 3, pp. 387-401.
 15. W. C. Erickson, M. J. Mahoney, K. Erb. Astrophys. J. Suppl. Ser. 1982, 50, pp. 403-419.
 16. Л. Л. Базелян, Ю. М. Брук, А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин. Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1964, 7, No. 2, с. 215-224.
 17. Л. Г. Содин. Радиотехника и электроника. 1964, 9, No. 7, с. 1179-1187.
 18. Ю. М. Брук, Л. Г. Содин. Радиотехника. 1966, 21, No. 7, с. 16-25.
 19. Ю. М. Брук, Н. Ю. Гончаров, А. В. Мень, Л. Г. Содин, Н. К. Шарыкин. Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1967, 10, No. 5, с. 608-619.
 20. С. Я. Брауде, А. В. Мень, Л. Г. Содин. Сборник "Антенны" под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып.26, с. 3-15.
 21. А. В. Мень, П. А. Мельяновский. Сборник "Антенны" под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып.26, с. 58-75.
 22. А. В. Мень, В. П. Бовкун. Сборник "Антенны" "Антенны" под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып.26, с. 75-91.
 23. Ю. М. Брук, Г. А. Инютин. Сборник "Антенны" под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып.26, с. 91-107.
 24. Ю. М. Брук, Г. А. Инютин. Сборник "Антенны" под ред. А. А. Пистолькорса. Москва, Связь, 1978, вып.26, с. 107-121.
 25. Л. Г. Содин. Радиотехника и электроника. 1967, 12, No. 12, с. 2108-2117.
 26. Ю. М. Брук. Радиотехника. 1969, 24, No. 12, с. 51-58.
 27. П. А. Мельяновский, А. В. Мень. Электро-связь. 1971, No. 10, с. 66-71.
 28. А. В. Мень, П. А. Мельяновский. Электро-связь. 1972, No. 12, с. 45-48.
 29. Ю. М. Брук. Радиотехника. 1973, 28, No. 3, с. 46-50.
 30. A. V. Megn, S. Ya. Braude, S. L. Rashkovsky, V. A. Shepelev, N. K. Sharykin, G. A. Inyutin. Turkish J. of Physics. 1994, 18, No. 9, pp. 813-818.
 31. В. П. Бовкун, А. В. Мень. Изв. ВУЗов, "Радиофизика". 1983, XXVI, No. 11, с. 1357-1370.

URAN System of the Decametric Interferometers (I)

A. V. Megn, S. Ya. Braude, S. L. Rashkovskiy,
N. K. Sharykin, V. A. Shepelev, G. A. Inutin,
A. D. Khristenko, V. G. Bulatsen, A. I. Bratsenko,
V. V. Koshovij, Yu. V. Romanchev,
V. P. Thesevich, V. V. Galanin

The network of the broadband radio interferometers "URAN" which are destined for observations in decametric range is described. The radiointerferometers are located in Ukraine. In VLBI mode they provide the maximum resolution available at decametre wavelengths about 1 arcsec.