

ИЗВЕСТИЯ

ГЛАВНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ В ПУЛКОВЕ

СОДЕРЖАНИЕ — CONTENTS

	Стр.
1. Радиотелескоп РАТАН-600. <u>С. Э. Хайкин</u> , Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина . . .	3
The Radio Telescope RATAN-600. <u>S. E. Khaikin</u> , N. L. Kajdanovskii, Y. N. Parijskii and N. A. Esepkina (Summary) . . .	12
2. Методы радиоастрономического использования РАТАН-600. Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис . . .	13
The Methods of Radioastronomical Observations with the RATAN-600. Y. N. Parijskii and O. N. Shivrís (Summary) . . .	39
3. Выбор размеров отражающих элементов и расчет электрических характеристик радиотелескопа РАТАН-600. Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис . . .	40
Determination of the Sizes of Reflecting Elements and Calculation of the Electric Parameters of the RATAN-600. B. V. Braude, N. A. Esepkina, N. L. Kajdanovskii, Y. N. Parijskii and O. N. Shivrís (Summary) . . .	53
4. О работе антенны переменного профиля с плоским перископическим отражателем. Л. М. Гиндилис, Н. А. Есепкина, Н. С. Кардашев . . .	54
On the Operation of the Variable Profile Antenna with a Plane Periscopic Reflector. L. M. Gindilis, N. A. Esepkina and N. S. Kardashev (Summary) . . .	57
5. Особенности работы антенны переменного профиля при наблюдении вблизи зенита. Н. А. Есепкина, Ю. Н. Парийский . . .	58
Peculiarities of the Operation of Variable Profile Antennas in Observations Near the Zenith. N. A. Esepkina and Y. N. Parijskii (Summary) . . .	62
6. Аберрации главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. А. А. Стоцкий . . .	63
Aberrations of the Main Mirror of the Variable Profile Antenna and Scanning the Antenna Pattern by Shifts of the Primary Feed. A. A. Stotskii (Summary) . . .	76
7. О фазовых ошибках на раскрытии криволинейной антенны при смещении облучателя из фокуса. В. М. Спитковский . . .	77
On the Phase Errors at the Aperture of the Parabolic Aerial when the Feed is Shifted from the Focus. V. M. Spitzkovsky (Summary) . . .	82
8. Расчет шумовой температуры антенны радиотелескопа РАТАН-600. А. А. Стоцкий . . .	83
Calculations of the Noise Temperature of the RATAN-600 Antenna. A. A. Stotskii (Summary) . . .	88
9. Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600. А. З. Амстиславский, А. И. Копылов, <u>М. И. Просмушкин</u> . . .	89
The Construction of Reflecting Elements and the Secondary Mirror of the RATAN-600. A. Z. Amstislavskii, A. I. Kopylov and <u>M. I. Prosmushkin</u> (Summary) . . .	96
10. Использование двухступенчатого конденсаторного торможения в одномоторном приводе отражательных секций радиотелескопа РАТАН-600. Г. С. Голубчин . . .	97
A Double-Reduction Condenser Breaking as Used in a Monomotor Drive for the Reflecting Sections of RATAN-600. G. S. Golubshin (Summary) . . .	100
11. Отсчетно-установочные устройства секций кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600. А. И. Копылов, О. В. Чуканов, О. Н. Шиврис . . .	101
A Reading and Setting Device for the Sections of the RATAN-600 Circular Reflector. A. I. Kopylov, O. V. Chukanov and O. N. Shivrís (Summary) . . .	106
12. Эталонные отсчетно-установочные устройства секции кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600. Ю. К. Зверев, А. М. Контореро, В. Т. Мартынов, Ю. И. Павлюченков, Е. И. Степанов, О. В. Чуканов . . .	107
A Reference Reading and Setting Device for a Section of the RATAN-600 Circular Reflector. Y. K. Zverev, A. M. Contorero, V. T. Martynov, Y. I. Pavljuchenkov, E. I. Stepanov and O. V. Chukanov (Summary) . . .	109

	Стр.
13. Ошибки, возникающие в радиотелескопе РАТАН-600 от температурных воздействий. Ю. Л. Шахбазян	110
The Errors Arising in the RATAN-600 Due to Thermal Effect. Y. L. Shakhbazjan (Summary)	113
14. Геодезические работы при строительстве и юстировке радиотелескопа РАТАН-600. А. Г. Белевитин, Ю. К. Зверев	114
Geodesy in the Process of Mounting and Adjustment of the RATAN-600. A. G. Belevitin and Y. K. Zverev (Summary)	119
15. Разбивка фундаментов секций кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600. Ю. К. Зверев, А. П. Глазов	120
Laying Out of the Foundations of the RATAN-600 Sections. Y. K. Zverev and A. P. Glumov (Summary)	121
16. Юстировка антенны переменного профиля. Г. Б. Гельфрейх, Ю. К. Зверев, А. А. Стоцкий, О. Н. Шиврис	122
The Adjustment of the Variable Profile Antenna. G. B. Gelfreikh, Y. K. Zverev, A. A. Stotskiy and O. N. Shvris (Summary)	123
17. Экспериментальное исследование автоколлимационного метода юстировки антенны переменного профиля. А. А. Стоцкий, Н. Ходжамухамедов	12
Experimental Tests of the Autocollimation Method for Adjustment of the Variable Profile Antenna. A. A. Stotskiy and N. Khodzhamukhamedov (Summary)	13
18. Радиоастрономический способ юстировки антенн переменного профиля. Г. Б. Гельфрейх	131
The Radioastronomical Method of Adjustment of Variable Profile Antennas. G. B. Gelfreikh (Summary)	14
19. Контроль параметров антенны по радиоастрономическим наблюдениям. Ю. Н. Парийский	14
A Control of the Antenna Parameters by Radioastronomical Observations. Y. N. Parijskiy (Summary)	15
20. Радиометры сплошного спектра. Схемы и основные параметры. Д. В. Корольков	15
Radiometers of the Continuous Spectrum. The Schemes and Main Parameters. D. V. Korolkov (Summary)	16
21. Радиоспектрографы для радиотелескопа РАТАН-600. И. В. Госачинский, А. Ф. Дравских, Т. М. Егорова, В. А. Прохоров, Н. Ф. Рыжков	16
Radiospectrographs for the RATAN-600. I. V. Gossachinskiy, A. F. Dravskikh, T. M. Egorova, V. A. Prozorov, and N. F. Ryzhkov (Summary)	17
22. Радиоспектрограф на волну 21 сантиметр. Н. Ф. Рыжков	17
The Radiospectrograph Operating at 21 centimeter. N. F. Ryzhkov (Summary)	17
23. Защита радиометров от импульсных помех. В. А. Прохоров	18
A Protection of Radiometers from Pulse Interferences. V. A. Prozorov (Summary)	18
24. Обзор неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600. Л. М. Гиндилис, Н. С. Кардашев	18
Survey of the Sky with the RATAN-600. L. M. Gindilis and N. S. Kardashev (Summary)	18
25. Предполагаемые астрофизические задачи для радиотелескопа РАТАН-600. Г. Б. Гельфрейх, И. В. Госачинский, Ю. Н. Парийский	18
The Astrophysical Problems to Be Solved with the RATAN-600. G. B. Gelfreikh, I. V. Gossachinskiy and Y. N. Parijskiy (Summary)	18
26. О возможностях получения радиоизображений небесных тел с разрешением выше 10^{-2} секунды дуги. Ю. Н. Парийский, А. А. Стоцкий	19
On the Possibilities of Obtaining the Radio Images of Celestial Bodies with the Resolution More than 10^{-2} Seconds of Arc. Y. N. Parijskiy and A. A. Stotskiy (Summary)	2
27. Измерение параметров антенны и калибровка чувствительности радиотелескопа РАТАН-600 на волне 8 мм в режиме радиолокации. В. К. Голосков	2
Measurements of the Antenna Parameters and Calibration of the Sensitivity of the RATAN-600 at 8 mm in the Radar Regime. V. K. Goloskov (Summary)	2
28. Машинная обработка наблюдений радиолинии нейтрального водорода, полученных на неподвижной антенне. З. А. Алферова, Н. В. Бистрова, И. В. Госачинский, З. Г. Трунова	2
Computer Reduction of the Observations of the Neutral Hydrogen Radio Line Obtained with the Stationary Antenna. Z. A. Alferova, N. V. Bystrova, I. V. Gossachinskiy and Z. G. Trunova (Summary)	2
29. Экспериментальная проверка возможности сканирования диаграммы антенны переменного профиля при радиальных смещениях облучателя. В. М. Спитковский	2
An Experimental Test of the Possibility of Scanning the Diagram of the Variable Profile Antenna. Y. M. Spitkovskiy (Summary)	2
30. Экспериментальное исследование распределения облучения на отражателе переменного профиля большого пулковского радиотелескопа радиотехническими методами. В. Н. Боровик, Н. Г. Петерова, В. М. Спитковский, Г. М. Тимофеева	2
Experimental Investigations of Illumination of the Variable Profile Reflector of the Pulkovo Large Radio Telescope by Radiotechnical Methods. V. N. Borovik, N. G. Peterova, V. M. Spitkovskiy and G. M. Timofeyeva (Summary)	2
31. О чувствительности радиоинтерферометра интенсивностей. Д. В. Корольков	2
On Sensitivity of the Intensity Radiointerferometer. D. V. Korolkov (Summary)	2
32. О точности измерения координат при помощи антенны переменного профиля. Н. М. Липовка, А. А. Стоцкий	2
On the Precision of Coordinates as Measured by Means of the Variable Profile Antenna. N. M. Lipovka and A. A. Stotskiy (Summary)	2

Радиотелескоп РАТАН-600

С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина

Кратко описан проект радиотелескопа переменного профиля (АПП) предельного размера для волн 0.4—21 см. Основные параметры радиотелескопа: 1) диаметр — 576 м; 2) высота — 7.4 м; 3) эффективная площадь (при единичном наблюдении) $\approx 1000 \text{ м}^2$; 4) ширина горизонтальной диаграммы $\approx 5''$ на $\lambda = 0.8 \text{ см}$. Радиотелескоп снабжен перископом для ускорения обзора и наблюдений, требующих длительного сопровождения.

§ 1. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

РАТАН-600 — радиотелескоп высокой разрешающей силы и большой собирающей площади для диапазона волн 4 мм—21 см (рис. 1). РАТАН-600 в основном предназначен для астрономических исследований методами радиоастрономии и радиолокации, но может быть использован также для радиофизических исследований и прикладных целей.

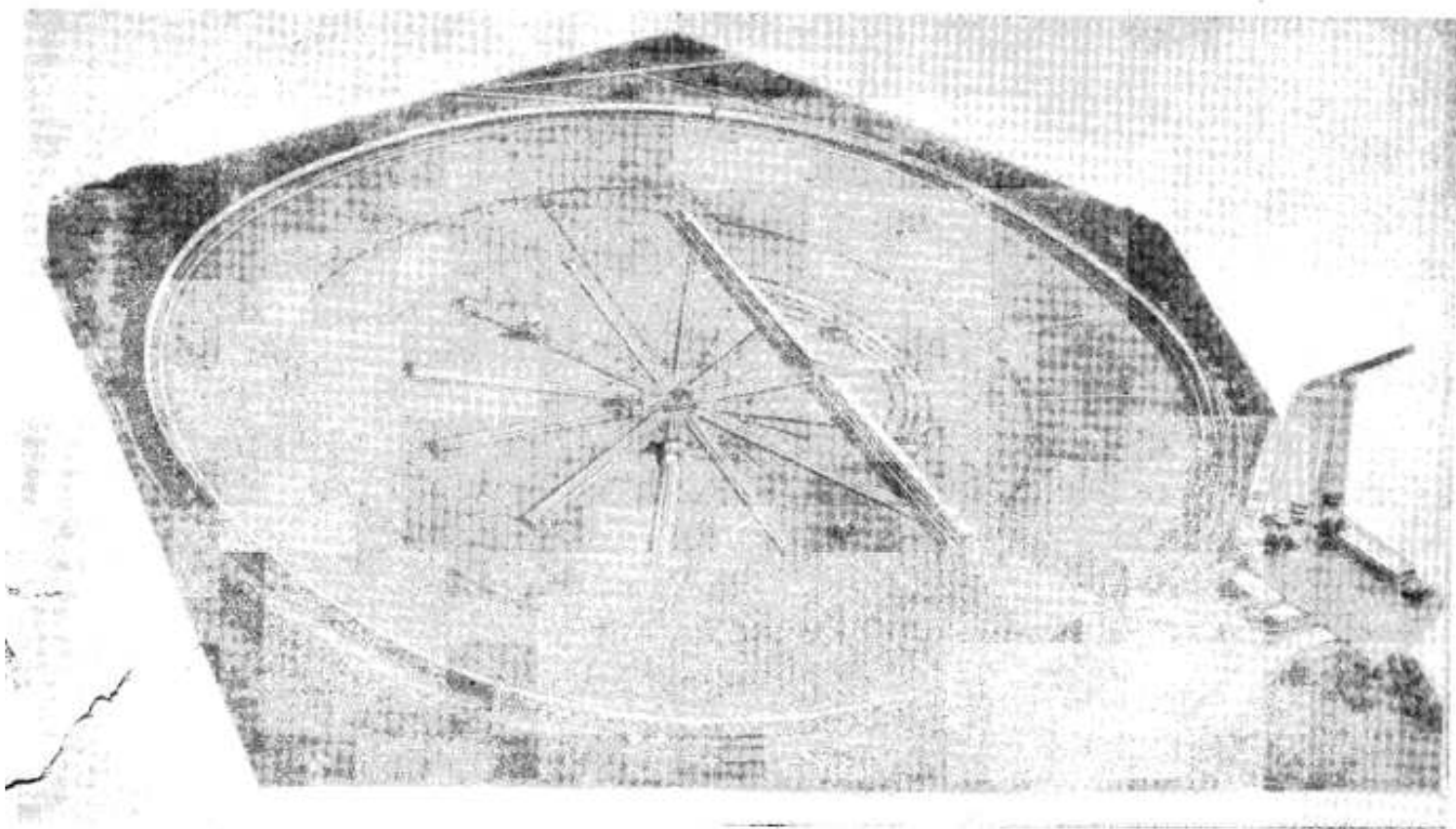


Рис. 1. Общий вид радиотелескопа.

1. Основные радиоастрономические проблемы:

а) детальное исследование объектов ближнего космоса, прежде всего с целью изучения физических условий на поверхностях планет Солнечной системы, их спутниках, астероидах;

б) изучение пекулярных квазизвездных радиоисточников и радиогалактик с аномально высокой интенсивностью радиоизлучения в этом диапазоне для выяснения природы этих объектов и источников энергии их радио- и оптического свечения;

в) систематический поисковый обзор неба на предельно высоких частотах. Такой обзор крайне необходим в связи с возможностью обнаружения квазизвездных радиоисточников в начальной стадии развития и в связи с малой изученностью этого диапазона. Предполагается провести оптическое отождествление обнаруженных объектов, для чего необходимо измерение координат с точностью $1''-0.1''$;

г) исследование тонкой структуры большого числа радиогалактик и определение их спектра распределения радиояркости и структуры магнитного поля этих объектов;

д) радионаблюдения Галактики и окрестностей Солнечной системы; ядра Галактики, тонкой структуры и кинематики газовых и планетарных туманностей, радиоизлучения пульсаров и ближайших звезд;

е) исследование распределения яркости в активных областях на Солнце с целью выявления структуры магнитных полей и конденсаций в нижней короне и верхней хромосфере. Исследование структуры хромосферы и переходного слоя.

Подробнее о перспективных радиоастрономических наблюдениях на РАТАН-600 см. [1, 2].

2. Задачи радиоастрономической локации:

а) измерение расстояний до планет, их лучевых и угловых скоростей;

б) измерение поглощения и рассеяния радиоволн в атмосферах планет с целью определения их состава и температуры, а также электронной плотности и структуры планетных ионосфер;

в) исследование характеристик рассеяния отраженной волны для суждения о шероховатости твердой поверхности планет и попытка картографирования некоторых планет.

3. Высокая разрешающая сила радиотелескопа может быть использована для исследования тонкой структуры неоднородностей тропосферы и облаков.

4. Существенной прикладной задачей для РАТАН-600 может стать определение мгновенных значений угловых координат космических кораблей с высокой точностью.

Для выполнения перечисленных научных задач необходим радиотелескоп с предельно высокими значениями разрешающей силы и собирающей площади, позволяющий свободно выбирать рабочие частоты и гибкий в отношении выбора методики наблюдений. Ниже будет показано, почему антенна переменного профиля (АПП) оказалась наиболее перспективной в этом отношении, и будет рассмотрено место, которое она занимает в технике современного радиотелескопостроения.

§ 2. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПИИ И РОЛЬ АНТЕНН ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Бурное развитие методов приема слабых сигналов и методов формирования «радиоизображения» приводит к необходимости тщательного анализа тенденций в радиотелескопостроении. Теоретическая разработка новых технических решений опережает темпы реализации решений, предложенных ранее, вследствие чего новые радиотелескопы иногда оказываются устаревшими к моменту вступления их в строй. Кроме того, быстро меняются и требования к радиотелескопам. Поэтому оказываются эффективными либо простые (т. е. быстро реализуемые) решения, которые, как правило, бывают весьма специализированными, либо, наоборот, достаточно универсальные системы (как правило, более сложные).

Прогресс основных параметров радиотелескопов — собирающей площади, разрешающей силы и чувствительности — характеризуют графики рис. 2. Из рассмотрения кривых следует, что за последние 20 лет рост идет приблизительно по экспоненте с улучшением параметров в e раз всего за 2—3 года.

Но, чем сложнее радиотелескоп, тем дольше продолжается его строительство и тем более высокие параметры радиотелескопа должны быть достигнуты, чтобы он не оказался морально устаревшим к моменту создания. Чтобы этого не случилось, необходимо разрабатывать и применять такие принципы построения радиотелескопов, которые позволяют достичь значительного улучшения их параметров при не слишком значительном усложнении.

Тщательный анализ требований к антенным системам с точки зрения фундаментальных задач радиоастрономии, с одной стороны, и опыта развития мировой антенной техники, с другой стороны, приводит к следующим заключениям.

1. Основной диапазон от 2 м до 4—8 мм. Крайне желательна полная свобода в выборе рабочих частот.

2. Разрешающая способность и точность определения положения должны быть близкими к оптической астрономии ($2''$ и $0.1''$ соответственно).

3. Чувствительность по плотности потока должна быть не менее $10^{-28}-10^{-30}$ Вт/м²·Гц.

Для некоторых задач желательно длительное сопровождение объектов исследования. Область обзора максимальная.

Классический путь построения сплошных параболических рефлекторных антенн не позволяет далеко продвинуться в сторону увеличения размеров радиотелескопов из-за конечной жесткости металлоконструкций и малой помехозащищенности от шумов неба [3, 4] вследствие флуктуации фона Метагалактики и яркости атмосферы Земли.

Существующие параболические антенны близки по размерам к предельным. Этот вид антенн полезен для патрулирования достаточно сильных объектов неба либо в комбинации с другими антеннами.

Рефлекторные антенны типа земляных «чаш» и цилиндров с элементами поверхности, «привязанными» к земле, позволяют создать большие приемные площади, но коэффициент использования их мал из-за трудностей сбора мощности в фокусе (конечной жесткости металлоконструкций облучателя). Кроме того, эти антенны также имеют малую помехозащищенность от шумов неба. Существующие системы такого типа близки по размерам к предельным.

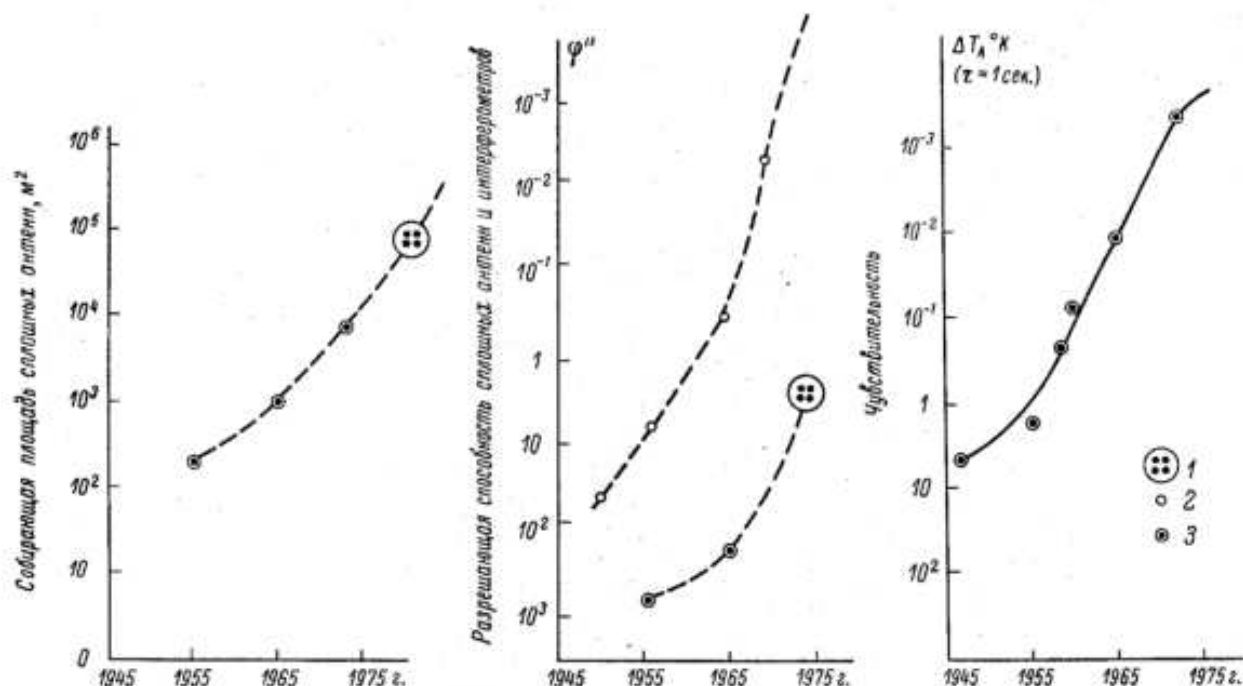


Рис. 2. Развитие технических параметров радиотелескопов.
1 — ожидаемая величина; 2 — интерферометры; 3 — сплошные антенны.

«Расчлененные» рефлекторные антенны типа «Краус», «Нансей», «Пулково» более перспективны. Достоинствами последней системы являются полная помехозащищенность от шумов неба, полный круговой обзор и принципиальная возможность слежения за объектом. Все эти системы ограничены в своих размерах главным образом действием атмосферной турбулентности. Размеры таких существующих радиотелескопов далеки от предельных. Возможно создание антенн такого типа предельного размера с площадями 10^5 – 10^6 м² и разрешением 1–3''. Экономически они значительно выгоднее антенн первых двух типов (параболоидов, чаш) [5].

«Расчлененные» антенны, фазиремые с помощью кабелей, получили в последнее время за рубежом широкое распространение, так как позволяют достаточно легко и дешево реализовать относительно высокие разрешения и большие приемные площади. Большие системы такого типа для метрового и декаметрового диапазонов волн построены в Советском Союзе (в Харькове, Серпухове). Эти системы, как правило, помехозащищаемы от шумов неба. Недостатками их являются сложность дальнейшего значительного увеличения размеров из-за трудностей фазирования элементов, сложность смены рабочего диапазона волн, их узкополосность и трудность использования в активном локационном режиме. Система такого типа, близкая по своим размерам к предельным, планируется к строительству в США.

Весьма перспективны «расчлененные» антенны с независимой записью сигнала на элементах, у которых фазирование достигается синхронизацией гетеродинов, системой единого времени и последующим машинным поиском. Этот способ позволяет объединять в единую систему существующие антенны (любого типа). Разрешающая способность их достигнет исключительно высокого значения (10^{-3} – 10^{-4} ''), чувствительность будет весьма низкой из-за крайне узких полос приема. Для повыше-

ния чувствительности необходимо использовать предельно большие антенны в качестве элементов системы. Использование большого числа малых антенн приведет к усложнению схемы и к резкому увеличению машинного счета.

Учитывая требования к радиотелескопам с точки зрения задач радиоастрономии, можно прийти к заключению, что с помощью двух антенн переменного профиля предельного размера на волны 0.4—10 см и 10 см—2 м, а также крестообразных антенн на метровые и декаметровые диапазоны волн можно перекрыть весь диапазон радиоастрономии, причем параметры по чувствительности и разрешающей силе будут выше, чем у всех существующих радиотелескопов.

§ 3. АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Научные задачи, перечисленные в § 1, требуют радиотелескопов предельно большой площади. При этом преимуществом по чувствительности при равной площади обладают радиотелескопы с большим разрешением.

Чувствительность радиотелескопов при использовании предельно маломощных приемников определяется флуктуацией яркости неба, обусловленной фоном слабых источников метagalактического излучения [6]. Чем ниже разрешение радиотелескопа (т. е. чем больше телесный угол θ^2 его синтезированной диаграммы направленности), тем больше абсолютная величина этих флуктуаций и тем ниже чувствительность радиотелескопа. Полностью реализовать чувствительность радиотелескопа становится возможным при условии, что θ^2 меньше, чем λ^2/S (где S — площадь), в 30—300 раз [6]. Такое «избыточное» разрешение может быть достигнуто в антеннах апертурного синтеза. Из всех антенн апертурного синтеза только антенны переменного профиля являются рефлекторными со всеми вытекающими отсюда преимуществами (диапазонностью, малыми потерями и пр.).

Предельные размеры антенн переменного профиля ограничиваются, как и для оптических телескопов, только условиями распространения радиоволн в атмосфере, а не достижимой точностью отражающей поверхности, как в случае обычных параболических антенн [7].

ОПИСАНИЕ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ РАТАН-600

Антенна переменного профиля — это многоэлементная антенна рефлекторного типа [8]. Отражающая поверхность антенны состоит из большого числа одинаковых, сравнительно невысоких плоских или слегка искривленных (цилиндрических) отражающих элементов. В начальном положении элементы расположены по окружности. Размеры отдельного отражающего элемента значительно меньше, чем общий размер антенны. Каждый элемент имеет три степени свободы: радиальное (поступательное) перемещение и поворот вокруг вертикальной и горизонтальной осей [8, 13]. Установка отражающих элементов в расчетное положение осуществляется с помощью электрических приводов, управляемых отсчетно-установочными устройствами [8, 13].

Диаграмма направленности антенны формируется в результате специального расположения отражающих элементов и облучателя, который находится в фокусе отражающей поверхности. Перемещение диаграммы направленности или изменение направления наблюдения происходит не за счет поворота всей отражающей поверхности в целом, как в обычных антеннах рефлекторного типа, а за счет перемещения облучателя и изменения взаимного положения отражающих элементов и облучателя, т. е. изменения формы отражателя. Именно поэтому антенна и называется антенной с отражателем переменного профиля.

Кривая, по которой устанавливаются центры отражающих элементов, изменяется от параболы при наблюдении на горизонте до окружности при наблюдении в зените [8].

В зависимости от угла места θ_0 одновременно используется различная часть отражающих элементов. Для углов, близких к горизонту ($\theta_0 \approx 0$), работает $\approx 1/4$ часть отражающих элементов, поэтому на радиотелескопе можно одновременно наблюдать в 4 направлениях. При малых углах места антенна имеет примерно прямоугольный синфазный раскрыв и ножевую диаграмму направленности.

Малый горизонтальный раскрыв ножевой диаграммы $\theta_r \approx \lambda/1.3 R$, определяется горизонтальным размером антенны, равным примерно $1.3R$ радиуса окружности антенны. Вертикальный размер диаграммы $\theta_z \approx \lambda/h$ определяется высотой отражающего элемента h .

Для низких углов места двумерное распределение с точностью до меньшего раскрыва ножевой диаграммы можно определить за счет наблюдения при различных положениях ножевой диаграммы, т. е. при наблюдениях в различных азимутах. Это так называемый последовательный синтез игольчатой диаграммы за счет поворота ножевой диаграммы.

Таким образом, при малых углах места антенна переменного профиля является обычной рефлекторной антенной или антенной с заполненной апертурой, причем так как антенна имеет ножевую диаграмму, то в ней можно получить двумерное распределение путем последовательного синтеза ножевой диаграммы.

На средних углах места ($\theta_0 \approx 30-80^\circ$) одновременно работает до $1/3$ части отражающих элементов. Синфазный раскрыв антенны имеет форму части кольца, ширина которого $h_0 = h \cos \theta_0/2$ значительно меньше глубины, $H = H_0 \sin \theta_0$, где H_0 стрела используемого сегмента антенны.

Антенна имеет ножевую диаграмму с мало отличающимися размерами, так как вертикальный размер диаграммы $\theta_r \approx \lambda/H$ определяется в этом случае не высотой элемента, а глубиной кольцевого раскрыва. Малый раскрыв пожа и в этом случае определяется горизонтальным размером антенны, равным примерно $1.5R$, т. е. $\theta_r \approx \lambda/1.5R$.

Для углов, близких к 90° , одновременно можно использовать все отражающие элементы. В этом случае антенна имеет замкнутый кольцевой раскрыв, ширина которого определяется проекцией высоты отражающего элемента $h_0 = h \cos \theta_0/2$, а радиус — радиусом окружности, по которой расположены элементы [10]. Ширина кольца значительно меньше диаметра (обычно высота элемента $h \approx 1-3\% R$). В этом случае антенна имеет игольчатую диаграмму, ширина которой $\theta_r = \theta_a \approx \lambda/2R$ определяется диаметром антенны $2R$.

При очень больших углах места характеристики антенны переменного профиля аналогичны характеристикам кольцевой антенны, предложенной в Австралии Уайлдом [11], только в отличие от австралийской антенны в нашем случае раскрыв представляет собой сплошное кольцо.

Для углов, близких к 90° , антенна переменного профиля имеет высокое разрешение по обеим координатам, определяемое диаметром кольца, а не его площадью. Площадь антенны для этих углов определяется площадью всех отражающих элементов [10].

Положение фокуса перемещается в зависимости от угла места. В фокусе антенны расположен линейный облучатель, высота которого примерно равна высоте отражающего элемента ($0.8h \div h$). При правильном выборе высоты облучателя у антенны переменного профиля удастся получить низкую шумовую температуру и малое переоблучение по вертикали [12].

Облучатель выполняется в виде специального вторичного отражателя — несимметричного параболического цилиндра [13]. Положение облучателя зависит от направления наблюдения. Как было указано выше, антенна переменного профиля является антенной рефлекторного типа, поэтому синфазное сложение сигналов от всех элементов осуществляется в ней независимо от длины волны. Диапазон волн, в котором может работать антенна, определяется размерами элементов [12].

Максимальная длина волны $\lambda_{\max}$ зависит от высоты отражающего элемента и выбирается из условия, чтобы переоблучение антенны по вертикали при заданной высоте элемента было незначительным. Это возможно лишь в том случае, когда отражатель (отражающие элементы) находится в ближней зоне облучателя.

Минимальная длина волны определяется размерами отражающего элемента антенны. Если заданы $\lambda_{\max}$ и $\lambda_{\min}$, то при заданном радиусе антенны можно найти высоту и ширину отражающих элементов [12].

Антенна переменного профиля может работать и на волнах длиннее, чем $\lambda_{\max}$, но с меньшим коэффициентом использования, так как в этом случае появляются дополнительные потери за счет переоблучения по вертикали.

Ширина полосы частот, в которой работает антенна, определяется шириной полосы пропускания приемника. В антенне переменного профиля легко обеспечить одновременную работу на нескольких волнах, поместив в фокусе вторичного зеркала любого типа совмещенный облучатель или разместив ряд первичных облучателей вдоль фокальной линии вторичного зеркала — параболического цилиндра. Для сопровождения или повторного наблюдения источников при их движении в зоне допустимой аберрации главного отражателя первичные облучатели можно перемещать (без дополнительной аберрации) на несколько длин волн вдоль фокальной линии параболического цилиндра [13]. Возникающую в АПП за счет искривления синфазного раскрыва паразитную круговую поляризацию можно скомпенсировать, применяя специальные первичные облучатели с управляемой поляризационной диаграммой [14].

Отражающая поверхность антенны переменного профиля, как в любой рефлекторной антенне, должна быть выполнена с точностью порядка $\epsilon < \lambda_{\min}/10$. Требуемая точность достигается за счет установки отражающих элементов геодезическими, а также радиотехническими методами [15].

Известно, что точность геодезической установки первого класса ($\sim 10^{-6}$) примерно на два порядка превышает возможную точность выполнения металлоконструкций ($\sim 10^{-4}$). Поэтому предельный горизонтальный размер антенны переменного профиля должен в сто раз превосходить предельный размер сплошных параболических подвижных антенн, однако ошибки, возникающие при распространении через турбулентную атмосферу, несколько снижают предельные размеры антенны [9]. Высота отражающих элементов выбирается такой, чтобы требуемая относительная точность ($\delta \approx \epsilon/h$) не превосходила 10^{-4} . Коэффициент использования в антенне переменного профиля получается примерно таким же, как в обычных рефлекторных антеннах.

Радиотелескоп РАТАН-600 является антенной переменного профиля, у которой в южном секторе имеется плоское перископическое зеркало, подобно тому как в антенне «Краус» или «Нансей» [16].

При работе с перископом отражающие элементы основного отражателя могут образовывать параболический или круговой цилиндр с вертикальными образующими. В первом случае в фокусе должен быть установлен обычный облучатель АПП, например параболический полуцилиндр с горизонтальной образующей. При отражателе в виде кругового цилиндра облучатель должен иметь специальную форму, чтобы корректировать фазовые ошибки кругового отражателя. Перископический отражатель можно поворачивать на угол 60° от вертикали.

Элементы плоского перископического отражателя можно укладывать на землю, чтобы использовать южный сектор отражателя для наблюдения в северном направлении в режиме АПП.

Для наблюдений в различных азимутах на площадке РАТАН-600 используются радиальные рельсовые пути для облучателя.

Радиотелескоп будет снабжен 4 облучателями для преобразования цилиндрической волны в сферическую и одним облучателем с коррекцией сферической абберации (при установке отражателя по круговому цилиндру). На облучателях будут установлены предельно чувствительные радиометры сплошного спектра, перекрывающие диапазон $0.8-30$ см ^[17], а также спектрометры для линий нейтрального и возбужденного водорода, гелия, ОН и др. ^[18]. Облучатель с коррекцией будет использован для радиоастрономической локации и спектральных задач, требующих длительного сопровождения.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ НА РАТАН-600

Замкнутый круговой отражатель радиотелескопа РАТАН-600 позволяет получать двумерное изображение источника с разрешением соответствующим диаметру радиотелескопа, ~ 600 м. На волне 1 см разрешение уже близко к разрешению оптических инструментов $\sim 3''$, а точность определения координат точечного источника ~ 0.1 как по прямому восхождению, так и по склонению. Основной метод работы на РАТАН-600 — последовательный апертурный синтез за счет совместной обработки результатов многократных наблюдений источников при их прохождении через неподвижную диаграмму направленности антенны в различных азимутах и при различных позиционных углах. Эффективная площадь синтезированной антенны $\sim 4 \cdot 10^3$ м² для волн короче 3 см и $\sim 7 \cdot 10^3$ для волн большей длины.

Радиотелескоп при достаточно больших углах места можно использовать также в режиме параллельного синтеза как за счет образования искривления синфазного раскрыва ^[9], так и путем одновременного использования нескольких облучателей, каждый из которых облучает свой сектор отражающей поверхности ^[19]. Использование искривления синфазного раскрыва особенно эффективно при наблюдении из области зенита, когда единственный облучатель собирает излучение, отраженное от всей кольцевой отражающей поверхности ^[10].

Облучатели АПП можно использовать также для одновременных наблюдений различных источников в 4 секторах. Расчлененность отражающей поверхности АПП позволяет легко менять ее конфигурации, формируя комбинированные диаграммы направленности ^[19]. При одном облучателе, помимо нормальной ножевой диаграммы, можно получить удлиненную в несколько раз ножевую диаграмму, что может быть удобным для задачи обзора неба или поиска. Ширина образованной таким образом горизонтальной диаграммы будет зависеть от способа группирования отражающих элементов. Возможно также образовать ряд ножевых диаграмм, смещенных по азимуту. В принципе это позволяет получить двумерное разрешение или определить обе координаты точечного источника при однократном наблюдении. Описанные способы использования гибкости отражающей поверхности для формирования комбинированных диаграмм направленности могут потребовать большей свободы радиальных перемещений отражающих элементов, чем при обычной работе.

В тех случаях, когда механизмы отражающих элементов не смогут обеспечить необходимого радиального перемещения, можно допустить эшелонирование на величину, кратную длине волны. Разумеется, эшелонирование допустимо при работе антенны только на одной или нескольких кратных волнах. Комбинированные диаграммы можно использовать по относительно мощным источникам, так как разделение отражающей поверхности на группы связано с потерей эффективной площади. Перископическое зеркало РАТАН-600 предназначено главным образом для задач обзора неба ^[16]. Элементы отражающей поверхности при работе с перископом установлены вертикально, синфазный раскрыв не искривлен, и поэтому вертикальная диаграмма направленности имеет значительный размер, соответствующий относительно небольшому вертикальному размеру отражателя. Благодаря ножевой диаграмме радиотелескопа и возможности изменения угла склонения только за счет поворота перископа можно быстро обозреть 80% небесной сферы. После обнаружения в процессе обзора нового источника его систематическое исследование должно продолжаться в других секторах АПП. При наблюдении слабых источников радиоизлучения может оказаться целесообразным увеличить время регистрации, сопровождая источник диаграммой направленности. Чувствительность радиотелескопа в режиме сопровождения может улучшиться при условии, что при этом существенно не возрастут флуктуации антенной температуры за счет возникающих при сопровождении изменений рассеянности

фона излучения земли. Длительное сопровождение источника необходимо также при радиоастрономической локации и в ряде спектральных задач, где требуется высокая чувствительность, а не разрешение. В южном направлении источник можно сопровождать длительное время, порядка 1—2 час., пользуясь плоским перископическим зеркалом. Для этого отражающие элементы должны образовать круговой цилиндр с вертикальными образующими, а вместо обычного облучателя нужно применить специальный облучатель с фазовой коррекцией [26]. При сопровождении источника облучатель радиотелескопа должен перемещаться по круговым путям с радиусом, приблизительно равным половине радиуса исходной окружности. С обычным облучателем АПП также возможно сопровождать источник или повторять его наблюдения в течение ограниченного времени, — пока он проходит зону допустимой абберации главного отражателя, меняя направление диаграммы направленности за счет выноса первичного облучателя из фокуса [20].

Смещение облучателя в осевом направлении позволяет изменять высоту наблюдения на несколько вертикальных диаграмм (по $1/2$ мощности), если угол места достаточно велик.

Смещение облучателя в поперечном направлении (в случае облучателя типа параболического цилиндра достаточно смещать первичный облучатель) также позволяет изменять азимут наблюдения на несколько горизонтальных диаграмм.

При наблюдении из области зенита становится возможным менять направление наблюдения на значительную величину — порядка сотни угловых растворов диаграммы направленности.

Полному использованию чувствительности предельных радиометров радиотелескопа РАТАН-600 может помешать флуктуация излучения атмосферы, обусловленная ее турбулентностью или облаками. Для предотвращения этого эффекта будет производиться сканирование диаграммы направленности на угол, превышающий угловой размер источника, что вызовет модуляцию сигнала. При этом, если источник невелик, излучение атмосферы не будет промодулировано, так как атмосфера находится в ближней зоне антенны и область, излучающая в антенну, практически не меняется за период модуляции, так как сканирование производится достаточно быстро и с малой угловой амплитудой [4].

ЮСТИРОВКА РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

Ввиду чрезвычайно больших размеров радиотелескопа РАТАН-600 и предельно высокой относительной точности поверхности отражающих элементов (10^{-4}) и их взаимной установки (10^{-6}) проблема юстировки радиотелескопа приобретает исключительно важное значение. Она распадается на следующие 4 задачи:

- а) первоначальная установка механизмов отражающих элементов на фундаментах;
- б) первоначальная корректировка отражающей поверхности каждого элемента и облучателей;
- в) определение мест нулей и ошибок всех шкал на механизмах отражающих элементов;
- г) контроль юстировки путем снятия диаграммы направленности по наземным и космическим источникам радиоизлучения.

Выполнение перечисленных задач опирается на 3 различных метода: а) геодезический [27], б) радиотехнический [22], в) радиоастрономический [21].

Каждый метод имеет свои преимущественные задачи, но некоторые задачи юстировки можно выполнять различными методами, что позволяет осуществлять их взаимный контроль. Предварительное корректирование поверхности отражающих элементов и облучателя выполняется на стенде механическими и оптическими средствами. Периодический контроль поверхности, который может понадобиться вследствие возможных поворотов несущих ферм, производится в рабочем положении.

Первоначальная установка механизмов отражающих элементов, а также плановая разбивка фундаментов и анкерных гнезд выполняются геодезическим методом с помощью опорной геодезической сети [27]. Так как в дальнейшем, при эксплуатации радиотелескопа, опорная геодезическая сеть будет использована для высокоточных измерений нуль-пунктов шкал отражающих элементов, то она должна быть выполнена по I классу точности.

Пункты опорной планово-высотной геодезической сети представляют собой специальные геодезические центры, сохраняющие с высокой точностью (10^{-6}) плановое положение и высоту [27]. Места нулей на шкалах механизмов могут быть определены геодезически и с помощью фазового компаратора [24], а также методом автоколлимации [22].

Для юстировки АПП можно применить также радиоастрономический метод. Он имеет высокую точность, и его целесообразно использовать после предварительной грубой установки поверхности антенны. При радиоастрономической юстировке используются отраженные от отдельных отражающих элементов потоки радиоизлучения космического источника с известными координатами. Сравнение отсчетов по шкалам азимута и угла места, соответствующих максимуму сигнала при отражении одним элементом, с вычисленными позволяет найти положение нулей этих шкал. Для корректирования шкалы радиального перемещения используются два отражающих элемента, образующих двухантенный интерферометр. Максимумы сигнала в облучателе соответствуют синфазности полей, отраженных от поверхностей обоих элементов. Сравнение отсчетов шкал при условии синфазности

с рассчитанными для известных координат источника позволяет определить нуль-пункты шкал. Радиоастрономический метод юстировки требует радиометров высокой чувствительности и относительно мощных космических источников радиоизлучения. Использование протяженных источников, например Солнца или Луны, возможно только на тех волнах, при которых расстояние между интерференционными лепестками превышает угловой размер источника. Преимущество радиоастрономического метода заключается в том, что настройка антенны производится в реальных условиях наблюдения при различных углах места и без применения каких-либо специальных устройств.

Юстировочные работы на радиотелескопе РАТАН-600 должны носить характер постоянной службы корректирования нуль-пунктов и поправок к шкалам для исключения ошибок, возникающих за счет медленных необратимых деформаций почвы, фундаментов, несущих ферм и механизмов.

Измерение электрических характеристик АПП — диаграмм направленности и эффективной площади — можно производить пользуясь космическими источниками с известными потоками и достаточно малыми угловыми диаметрами. Кроме того, для той же цели можно пользоваться наземными источниками.

Однако обычный способ, когда источник находится в дальней зоне антенны, здесь неприменим, так как дальняя зона РАТАН-600 начинается с расстояний, превышающих несколько тысяч километров. Для измерения электрических характеристик АПП по наземному генератору отражающие элементы АПП, установленные для наблюдения под некоторым углом места на эллипсе с определенным эксцентриситетом, нужно поставить вертикально, сохранив положение облучателя с радиометром в 1-м фокусе и расположив облучатель генератора во 2-м фокусе эллипса. При этом поле, излучаемое 2-м фокусом, будет синфазно собрано в 1-м [25]. Вертикальную и горизонтальную диаграммы направленности можно измерить, смещая облучатель в осевом и поперечном направлениях. Таким способом можно проверить настройку антенны для углов места $> 60^\circ$, так как для углов $< 60^\circ$ 2-й фокус выходит за пределы окружности. Описанный метод был экспериментально проверен на большом пулковском радиотелескопе.

Настройку южного сектора РАТАН-600 можно проверить с помощью перископического зеркала, поставленного вертикально, автоколлимационным способом.

§ 4. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ РАТАН-600

1. Для радиоастрономической станции РАТАН-600 выбрана площадка в 45 га на южной окраине станции Зеленчукской (Карачаево-Черкесская автономная область Ставропольского края).

При выборе площадки учитывались следующие обстоятельства:

а) географическая широта и углы закрытия; б) помехозащищенность; в) метеоусловия (количество осадков, влажность абсолютная и относительная, сила ветра); г) атмосферная турбулентность (на основании данных по качеству оптического изображения и дрожания звезд); д) геологическое строение и устойчивость почвы на площадке; е) возможность непосредственной связи с астрономическими обсерваториями; ж) жилищно-бытовые условия и доступность железнодорожного и авиатранспорта; з) стоимость строительства и наличие местных строительных организаций.

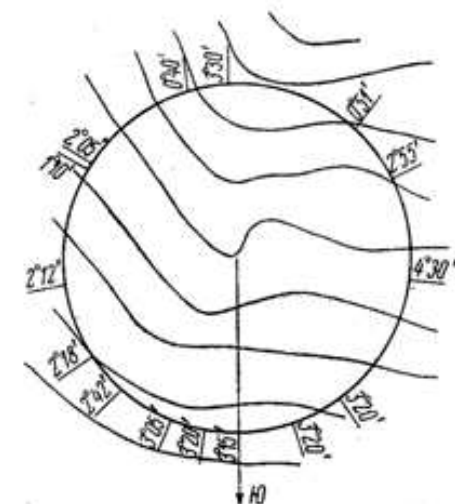


Рис. 3. Углы закрытия на площадке РАТАН-600.

Выбор площадки производился по крупномасштабным картам с последующим осмотром и топографической оценкой площадок на месте. Всего было обследовано 27 площадок. В двух случаях производились теодолитная съемка и откопка шурфов.

На площадке РАТАН-600 было проведено исследование уровня помех в наиболее опасном дециметровом диапазоне, из которого следовало, что помеха носит случайный характер, не повторяется в тот же момент в последующие дни, кратковременна (2—7 мин.) и невелика по уровню. Длительных помех локационного или промышленного характера не наблюдалось.

На основании проведенных измерений и принимая во внимание, что в районе и вблизи него нет аэродромов, телевизионных центров, и крупных промышленных предприятий, а также закрытость горизонта (рис. 3), можно считать выбранную площадку удовлетворительной по уровню помех в настоящее время и в перспективе.

Углы закрытия служат надежной защитой от помех и в то же время не мешают радиоастрономическим наблюдениям. По астроклиматическим данным — количеству ясных дней и дрожанию звезд, — район можно считать хорошим.

Удовлетворительными являются также метеорологические характеристики. Следует отметить очень низкую скорость среднего ветра (1.025 м/сек.). Топографическая съемка участка в масштабе 1 : 2000 показала, что площадка ровная, но имеет уклон к северу порядка 0.5° . Нивелировка площадки не потребует больших затрат на земляные работы, так как она будет проводиться

не по всей площади, а только на кольце под фундаментами антенны и под радиальными и кольцевыми рельсовыми путями для облучателей. Согласно геологическим изысканиям, под тонким слоем глины однородно расположен до глубины 12—15 м слой гальки, достаточно устойчивый для фундаментов и обеспечивающий сток поверхностных вод в р. Хусу.

Запланированное строительство плотины на р. Зеленчуке выше площадки РАТАН-600 может в дальнейшем понизить уровень грунтовых вод.

Расположение радиотелескопа РАТАН-600 и всего комплекса зданий и сооружений представлено на рис. 4. Для обеспечения научно-исследовательской и хозяйственной деятельности станция будет иметь в своем составе следующие помещения:

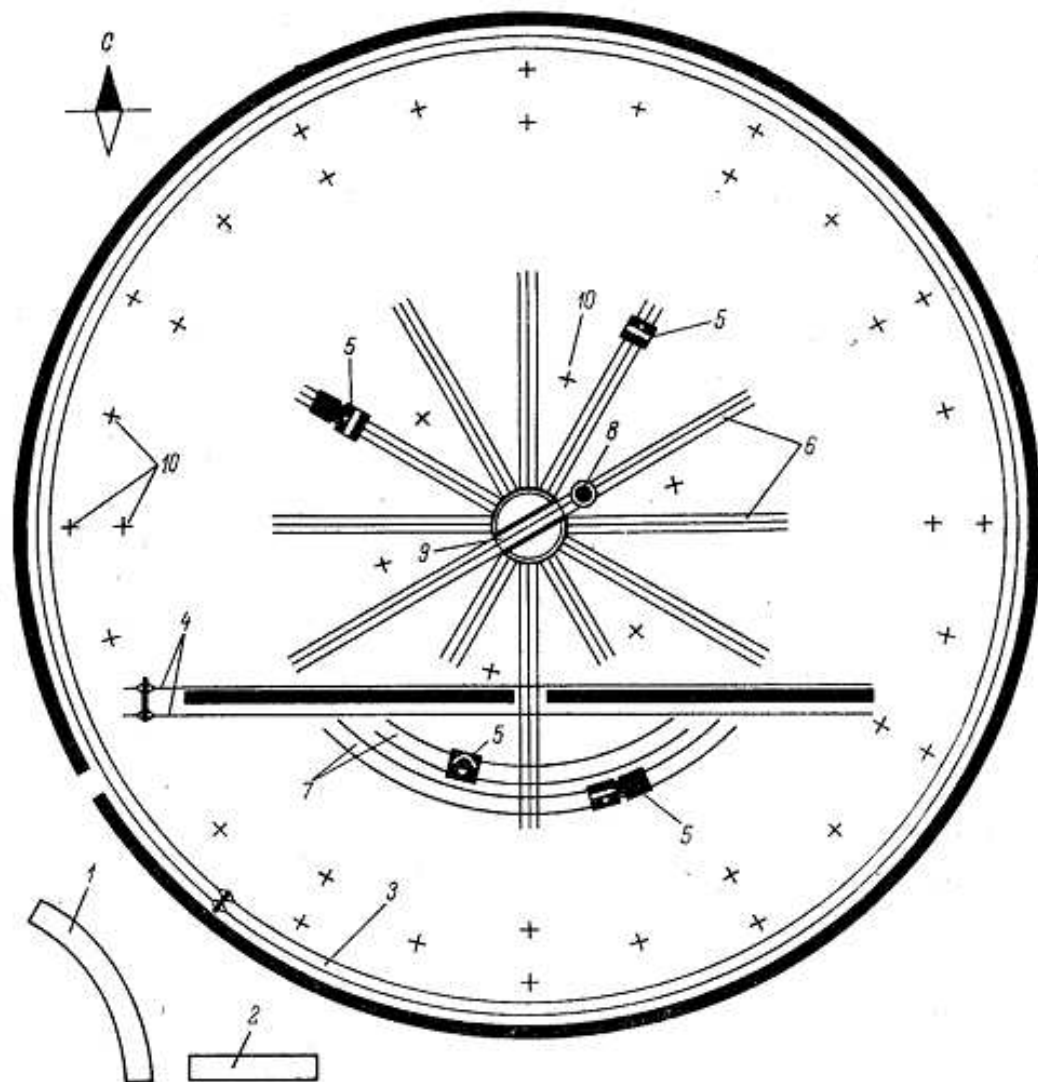


Рис. 4. Схема расположения основного оборудования и сооружений на площадке РАТАН-600.

1) лабораторию с техблоком (1), содержащим: а) криогенную станцию с производительностью 4 л/час жидкого гелия и 10 л/час азота, б) компрессорную для сжатия газов с гелиевыми газгольдерами, в) 2 мотор-генератора мощностью 75 ква, г) телефонный коммутатор;

2) экспериментальные мастерские (для монтажа и ремонта секций отражающей поверхности) со складом (2);

3) трансформаторную подстанцию на 1260 ква.

Питание радиометров радиотелескопа, а также щитков в лаборатории стабильным напряжением будет осуществляться от мотор-генератора с 3-фазным генератором 220×380 с автоматическим регулированием возбуждения.

На круговой площадке радиотелескопа для монтажа и обслуживания элементов кругового отражателя проложена с внутренней стороны подкрановая дорога для консольного крана (3). Вдоль перископического плоского отражателя проложены подкрановые пути для козлового крана (4), с помощью которого будет производиться монтаж плоских элементов и укладка их в горизонтальное (рабочее) положение.

Рельсовые пути для облучателей (5) включают 12 радиальных путей (6) через 30° и два круговых (7) для наблюдений с обычным и коррекционным облучателями. Круговой рельсовый путь для облучателя с коррекцией имеет радиус, близкий к $1/2$ радиуса отражателя, служит для длительного сопровождения источников при радиоастрономических и радиолокационных наблюдениях.

Круговой путь большого радиуса используется для наблюдений в пределах азимутов $\pm 30^\circ$ от юга в тех случаях, когда необходимо сохранить при больших углах места ножевую диаграмму направленности с большим вертикальным размером и при поляризационных наблюдениях, требующих малой паразитной круговой поляризации. В центре круга находится специальный облучатель для наблюдений из области зенита (8). Юго-западный радиус (60°) имеет выход через разрыв в отражателе за пределы круга. Для перевода облучателя с одного радиуса на другой служит поворотный круг (9). Южный радиальный путь проходит через разрыв в перископическом отражателе.

Облучатели на радиальных и круговых путях получают питание техническим и стабилизированным напряжением через гибкие планги и разъемы. К облучателям подводится также камерный телевизионный планг, содержащий высокочастотные и связные провода, для подачи стабильных частот, сигналов точного времени и для связи. Для сбора гелия будет продолжена сеть вдоль рельсовых путей облучателей.

Обеспечение точной установки отражателей и облучателей радиотелескопа осуществляется с помощью сети плановых и высотных фундаментальных геодезических реперов (10) [27].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Л. М. Гиндилис, Н. С. Кардашев, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [2] Г. Б. Гельфрейх, И. В. Госачинский, Ю. Н. Парийский, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [3] S. Hoenig, A. J., 72, 1, 35, 1967.
- [4] Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский, Радиофизика, XI, 12, 1773, 1968.
- [5] С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский, А. А. Стоцкий, Ю. Л. Шахбазян, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО, № 182, 235, 1967.
- [6] С. Э. Хайкин, Ю. Н. Парийский, Изв. ГАО, № 172, 87, 1964.
- [7] Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Д. В. Корольков, Ю. Г. Кузнецов, С. Э. Хайкин, Радиотехника и электроника, XI, 8, 1405, 1966.
- [8] С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО, № 164, 3, 1960.
- [9] Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Б. Г. Кузнецов, Г. В. Кузнецова, С. Э. Хайкин, Радиотехника и электроника, XII, 1947, 1961.
- [10] Н. А. Есепкина, Ю. Н. Парийский, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [11] The Culgoora Radioheliograph Proc. Inst. Radio and Electr. Eng. of Australia, 28, 9, 277, 1967.
- [12] Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [13] А. З. Амстиславский, А. И. Копылов, [М. И. Просмушкин], Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [14] Н. А. Есепкина, В. Ю. Петрунькин, Н. С. Соболева, Г. М. Тимофеева, Радиотехника и электроника, XIV, 10, 1870, 1969.
- [15] Г. Б. Гельфрейх, Ю. К. Зверев, А. А. Стоцкий, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [16] Н. А. Есепкина, Н. С. Кардашев, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [17] Д. В. Корольков, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [18] И. В. Госачинский, А. Ф. Дравских, Т. М. Егорова, В. А. Прозоров, Н. Ф. Рыжков, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [19] Ю. Н. Парийский, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [20] А. А. Стоцкий, Изв. ГАО, № 188, 000, 1972.
- [21] Г. Б. Гельфрейх, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [22] А. А. Стоцкий, Н. Ходжамухаммедов, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [23] Ю. Н. Парийский, Изв. ГАО, № 188, 1972.
- [24] А. А. Стоцкий, О. Н. Шиврис, Изв. ГАО, № 185, 1970.
- [25] С. Э. Хайкин, В. Ю. Петрунькин, Н. А. Есепкина, В. Н. Умецкий, Б. Г. Кузнецов, Б. А. Васильев, Изв. ГАО, № 172, 128, 1964.
- [26] И. В. Вавилова, в сб.: Антенны, вып. 5, изд. «Связь», М., 1969.
- [27] А. Г. Белевитин, Ю. К. Зверев, Изв. ГАО, № 188, 1972.

The Radio Telescope RATAN-600

S. E. Khaikin, N. L. Kaidanovskii, Y. N. Parijskii and N. A. Esepkina

SUMMARY

A project of the radio telescope with the variable profile antenna (VPA) with extremely large size for the wavelength of 0.4–21 cm is described in brief.

The main parameters of the radio telescope are as follows: 1) diameter — 576 m; 2) height — 7.4 m; 3) effective area (at one observation) — 1000 m²; 4) horizontal beam width — 5" at $\lambda = 0.8$ cm. The radio telescope is equipped with a periscope for quickening the survey and observations which require large exposure.