

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 167

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС "СУРА"
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ
ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ**

И.Ф. БЕЛОВ

В.В. БЫЧКОВ

Г.Г. ГЕТМАНЦЕВ

Н.А. МИТЯКОВ

Г.Р. ПАШКОВА

Горький 1983

УДК 551.510.535

Описана структурная схема передающего комплекса "Сура", предназначенного для решения научно-исследовательских и прикладных задач методом искусственного нагрева ионосферной плазмы, радиолокации Луны и планет и радиоастрономических исследований в диапазоне 4,5-9,0 МГц. Приведены основные характеристики комплекса.

Введение

Интенсивные исследования искусственных ионосферных возмущений, создаваемых радиоизлучением мощных радиопередатчиков, начались в 1970 г., когда были построены специальные исследовательские комплексы для воздействия на ионосферу вертикальным пучком радиоволн КВ диапазона. Энергетический потенциал таких комплексов характеризуется эквивалентной мощностью излучения P_G (P — мощность передатчика, G — коэффициент усиления передающей антенны). Первые установки имели потенциал $P_G \approx 150$ МВт в диапазоне 5 — 10 МГц (Боулдер) и $P_G = 20$ МВт на частотах 4,6 и 5,75 МГц (Горький). С их помощью обнаружены и исследованы искусственные ионосферные возмущения в F-слое ионосферы, вызывающие, в частности, ракурсное рассеяние радиоволн КВ и УКВ диапазонов [1, 2], изучены условия возбуждения и основные характеристики искусственной ионосферной турбулентности, и создана теория этого явления [2, 3]. В Горьком было обнаружено и исследовано новое явление генерации низкочастотного излучения при облучении ионосферы мощным модулированным КВ сигналом [4], проведены исследования квазипериодических ионосферных возмущений, возникающих в поле стоячей волны [5]. Физика явлений при взаимодействии мощного радиоизлучения с ионосферой охватывает значительную часть физики плазмы. Искусственные возмущения температуры и концентрации плазмы вызывают сложные процессы плазменной турбулентности, изменяют электрические и магнитные

поля, нарушают квазистационарные токи в плазме, приводят к ускорению электронов, возбуждению и ионизации нейтральных частиц и т.д.

Создание управляемых ионосферных возмущений позволяет разработать новые эффективные методы исследования ионосферной плазмы (определение концентрации и температуры электронов и ионов, констант ионизационно-рекомбинационных и диффузных процессов, динамики ионосферной плазмы и т.д.). Наконец, искусственные ионосферные возмущения радикально влияют на распространение радиоволн различных диапазонов, вызывая рассеяние, рефракцию и поглощение радиоволн.

В этой связи естественным процессом является создание новых устройств для исследования искусственных ионосферных возмущений. В последние годы создана установка стран НАТО [6] в Тромсе, Северная Норвегия ($P_{\text{ср}} = 200$ МВт в диапазоне $2,5 + 8$ МГц) и установка "Сура" [7] в рабочем поселке Васильсурск Горьковской области ($P_{\text{ср}} \approx 300$ МВт в диапазоне $45 + 90$ МГц). Кроме того, в СССР и за рубежом существует целый ряд установок с меньшим потенциалом, которые используются для исследования искусственных ионосферных возмущений.

При разработке комплекса "Сура" прежде всего учитывался круг задач, которые можно решать на базе этого комплекса. Основной задачей является исследование искусственных ионосферных возмущений, создаваемых мощным пучком радиоволн при вертикальном и наклонном падении на ионосферу. Критические частоты ионосферы в зависимости от времени суток, сезона и уровня солнечной активности изменяются от 8 до 10 МГц, поэтому для возбуждения искусственной турбулентности плазмы на различных высотах передающее устройство должно иметь достаточно широкий диапазон частот. Исходя из конструктивных соображений был выбран диапазон частот $4,5 + 9$ МГц. Для ряда экспериментов необходимо иметь пучок радиоволн с правой (или левой) круговой поляризацией, соответствующей обыкновенной (необыкновенной) волне в ионосфере. Кроме того, желательно изменение ширины пучка радиоволн и отклонение от вертикали примерно на $\pm 40^\circ$ в плоскости геомагнитного меридиана. Естественным также является требование

к обеспечению различных режимов модуляции радиосигнала, включая излучения радиоимпульсов с фронтом нарастания до 10 мкс. Все эти возможности заложены в конструкции передающего комплекса.

Модульное исполнение передающего комплекса (три передатчика ПКВ-250, работающих на три антенные секции) позволяет обеспечить как синфазную работу двух или трех передатчиков, так и автономную работу каждого передатчика на различных частотах. Перечисленные режимы работы передающего комплекса дают возможность постановки практически всех экспериментов по исследованию нелинейных эффектов, возникающих при распространении в ионосфере коротковолновых сигналов большой интенсивности.

Передающая антенна комплекса "Сура" имеет большую площадь (300 x 300 м²) и используется как радиоастрономический инструмент для исследования дискретных источников и фона космического радиоизлучения в декаметровом (4,5 - 9,0 МГц) диапазоне волн. С помощью комплекса "Сура" можно проводить радиолокационные исследования Солнца, планет и ближнего космоса в самом низкочастотном диапазоне радиоволн. При этом имеется возможность осуществлять как бистатическую, так и моностатическую локацию. Уже проведены эксперименты по моностатической локации Луны, когда радиолокационный сигнал излучался одной секцией антенны, а прием отраженного сигнала проводился на другую, отключенную от передатчика, секцию.

Таким образом, экспериментальный комплекс "Сура" является уникальным инженерным сооружением и превосходят лучшие зарубежные аналоги возможностями его многоцелевого использования.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. Выбор структурной схемы

Несмотря на то, что в настоящее время существуют промышленные типы коротковолновых передатчиков с вы-

ходной мощностью непрерывного излучения до 1 МВт, оптимальным вариантом нагревного комплекса является активная фазированная антенная решетка (ФАР), где в качестве усилительных модулей используются передатчики с выходной мощностью не более 200 + 300 кВт.

Во-первых, в такой структуре помимо основного режима - синфазного сложения мощностей передатчиков в пространстве, можно реализовать также целый ряд других полезных режимов (многочастотный режим; режим электрического сканирования диаграммой направленности антенны за счет управления фазовым распределением по входам передатчиков, приемо-передающий режим, режим с применением различных типов модуляции в каждом из модулей и т.д.).

Во-вторых, комплекс на основе активной ФАР обладает повышенной надежностью, так как выход из строя одного из передатчиков лишь незначительно снижает потенциал станда. Кроме того, в антенной системе комплекса отсутствуют узлы, работающие при сверхвысоких мощностях...

Наконец, построение ФАР из нескольких одинаковых секций, возбуждаемых собственными передатчиками, унифицирует конструкцию антенны и упрощает управление лучом.

При разработке структурной схемы станда кроме исходных требований к его электрическим параметрам (потенциал, диапазон частот, сектор сканирования и др.) были учтены также реальные ограничения на размеры антенной системы по стоимости и наличию свободных площадей на строительной площадке, возможность приобретения промышленных передатчиков типа ПКВ-250 "Выюга" и ряд других факторов.

Структурная схема комплекса, изображенная на рис. 1, содержит 144-элементную ФАР размерами 300 x 300 м и три 250-киловаттных передатчика "Выюга", нагрузками которых являются секции ФАР.

Каждая из трех секций ФАР размерами 100 x 300 м состоит из четырех 12-элементных линейных решеток (рядов) синфазного возбуждения. Антенна ориентирована так, чтобы плоскость сканирования луча, параллельная малой стороне секции, совпадала с плоскостью магнитного меридиана на высоте F-слоя ионосферы.

Выбранные размеры антенной секции в плоскости ска-

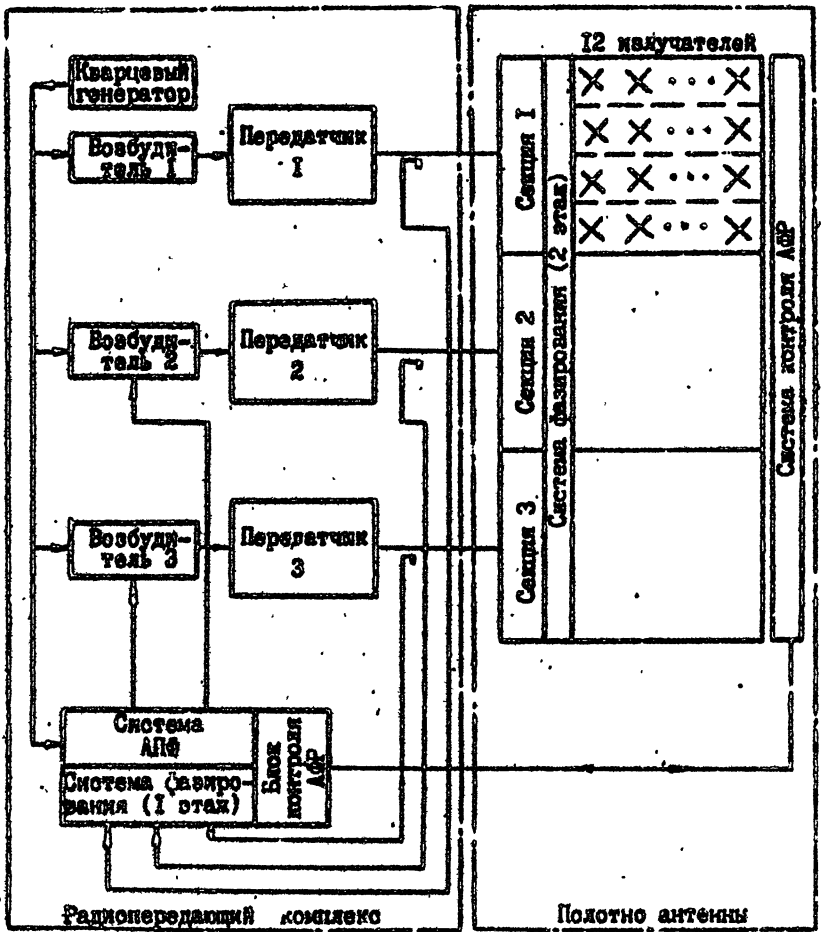


Рис. 1 Структурная схема комплекса "СУРА"

нирования близки к оптимальным с точки зрения минимума взаимной связи между входами секций (выходами передатчиков), с одной стороны, и схемной простотой системы фазирования ФАР с другой. Выбор поперечного размера секции, равного четырем периодам, позволил построить систему возбуждения рядов секции из бинарных развязанных делителей мощности, подавляющих взаимную связь между рядами излучателей по системе возбуждения.

В антенне применен временной принцип управления лучом, обеспечивающий независимость ориентации луча антенны от рабочей частоты передатчиков. Фазирование осуществляется линиями задержки (ЛЗ.), размещенными на двух этажах системы фазирования. Поскольку сканирование луча в секторе $+40^\circ$ от зенита производится дискретно с шагом 4° (что несколько меньше минимальной ширины диаграммы направленности ФАР $\Delta\theta_{3\text{дБ}}^{\text{min}} \approx 6^\circ$), число состояний ЛЗ. равно 21. ЛЗ. первого этапа системы фазирования включены в систему автоподстройки выходных фаз передатчиков и работают на уровне мощности менее 1 Вт. Этими ЛЗ. задается линейное фазовое распределение на входах секций. Быстродействующие ЛЗ. электрического сканирования луча ФАР также размещены на первом этаже системы фазирования. ЛЗ. второго этажа располагаются на антенном поле и работают при высоких уровнях мощности (до 70 кВт). Ими задается линейное фазовое распределение внутри отдельных секций, но пилообразное по своей решетке. В результате, совместное действие ЛЗ. обоих этажей дает линейное фазовое распределение по всей решетке, соответствующее выборанному направлению излучения.

При решении радиоастрономических задач ФАР работает в приемном режиме. При этом входы антенных секций переключаются на блок фазирования приемного режима. Блок фазирования объединяет ЛЗ. первого этажа и лучеобразующую матрицу, обеспечивающую одновременное наблюдение тремя близкорасположенными лучами в секторе сканирования.

2.2. Схема секции ФАР

Схема секции ФАР представлена на рис. 2. Излучаю-

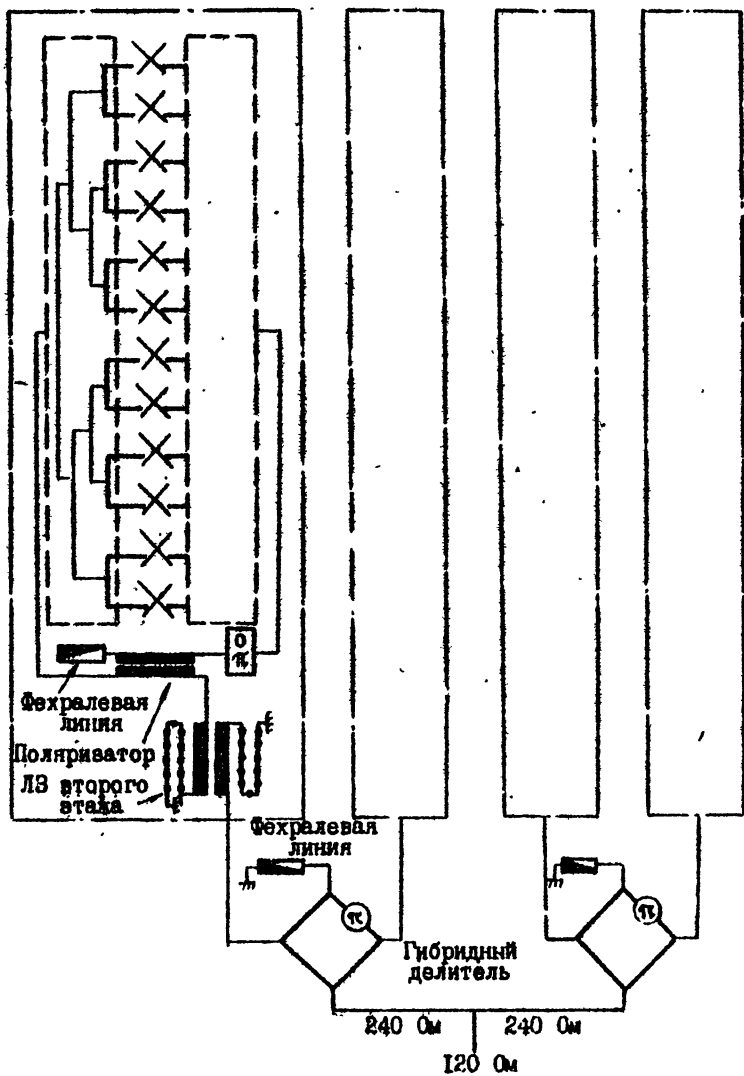


Рис. 2 Схема секции ФАР.

шим элементом решетки является турникет, составленный из двух ортогональных вибраторов, возбуждаемых в квадратуре. Излучатель такого типа обеспечивает в заданном секторе углов сканирования круговую поляризацию излучения с коэффициентом эллиптичности, близким к единице.

Вибраторы каждой линейной поляризации, образующие турникетные излучатели одного ряда, объединены в две синфазные линейные решетки с равномерным амплитудным распределением. Эти решетки возбуждаются через трехдцибельный нагрузенный ответвитель (поляризатор), создающий 90-градусный фазовый сдвиг токов в вибраторах турникетов и круговую поляризацию излучения. Смена знака поляризации осуществляется введением 180-градусного фазового сдвига на входе одной из линеек ряда за счет коммутации проводников двухпроводного фидера. В четвертое, развязанное относительно входа плечо поляризатора включена поглощающая фехралева линия, придающая поляризатору вентиляльные свойства. В ней гасятся отражения, передаваемые синфазно в это плечо со входов линеек ряда, то есть поляризаторы, включенные на входе каждого из рядов ФАР, являются одновременно и согласующими элементами между полотном излучателей и передатчиков. На входах поляризаторов расположены ЛЗ. второго этажа системы фазирования. Каждая из этих ЛЗ. реализована из трехдцибельного нагрузенного ответвителя, два взаиморазвязанных плеча которого нагружены одинаковыми короткозамкнутыми двухпроводными шлейфами переменной длины. Электрическая длина подобной ЛЗ. определяется удвоенной длиной шлейфов. Длины шлейфов ЛЗ. для левой и правой пар рядов секции изменяются в противофазе. Кроме того, дискрет изменения длины шлейфов ЛЗ. для двух внутренних рядов секции втрое меньше, чем для внешних рядов. Четырехканальный делитель мощности системы питания рядов секции состоит из двух развязанных делителей типа гибридного кольца, возбуждаемых через неразвязанный тройниковый делитель.

Период решетки, равный 25 м в обеих плоскостях, был выбран из условия отсутствия в области действительных узлов высших дифракционных максимумов для заданного рабочего диапазона частот и сектора сканирования луча.

2.3. Конструкция и характеристики элементов решетки

Вибратор представляет собой широкополосный биконический диполь со шлейфом (рис. 3), выполненный из восьми проводов диаметром 3 мм и подвешенный на высоте 12 м.

Конструкция вибратора была отработана экспериментально исходя из требований наилучшего согласования в рабочей полосе частот, малого веса, простоты и технологичности изготовления. Уровень К. С. В. Н. вибратора вне решетки, измеренный относительно волнового сопротивления питающего фидера 500 Ом, не превышает 2, а развязка между ортогональными вибраторами в турникете составляет более 25 дБ.

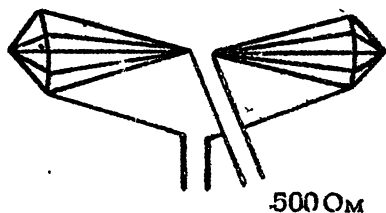


Рис. 3. Вибратор турникетного излучателя

12 - канальный делитель системы питания вибратора одной линейной поляризации каждого ряда реализован из неразвязанных тройниковых делителей, согласованных при помощи многоступенчатых четвертьволновых трансформаторов на симметричных многопроводных линиях. Равномерное амплитудное распределение достигнуто соответствующим выбором коэффициентов деления тройников, а синфазность излучателей - выравниванием электрических длин каналов делителя.

Поляризаторы представляют собой направленные ответвители со связью $3 + 0,3$ дБ в рабочем диапазоне волн, выполненные на связанных двухпроводных линиях из алюминиевых уголкового проводников. Поперечное сечение области связи изображено на рис. 4(а), длина области связи равна четверти волны на средней частоте диапазона (11 м). Волновое сопротивление нагрузок направленного ответвителем равно 240 Ом. Неоднородности сочленений ответвителя с фидерами, возникающие из-за больших размеров его попе-

речного сечения и имеющие характер последовательных ин-

дуктивностей, скомпенсированы емкостными шлей-
фами. Компенсация позволила снизить собственный КСВН ответ-
вителя до уровня меньше 1,2 и до-
стичь развязки
изолированных
входов более 21дБ.
Поглощающие
ферралевые
линии длиной
около $3\lambda_{\text{мдк}}$
300м, включенные
в развязанные со-
входами плечи по-
ляризаторов, име-
ют собственный
КСВН не более

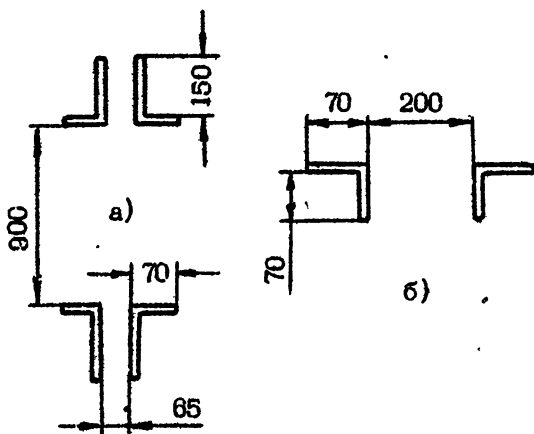


Рис. 4. Поперечное сечение области связи направленного ответ-
вителя (а) и короткозамкну-
тых отрезков ЛЗ. (б).

1,2 и рассчитаны на поглощение мощности до 50 кВт. Зазем-
ленные на дальнем конце, эти линии являются также элект-
ростатическим заземлителем той части антенны, которая
связана с ними гальванически.

Линии задержки второго этажа системы фа-
зирования построены на базе таких же трехдецибелльных
направленных ответвителей, что и поляризаторы. Двухпро-
водные отрезки фидеров (шлейфы), вдоль которых переме-
щаются короткозамыкающие переключки, выполнены из алю-
миниевых уголкового проводников с поперечным сечением,
показанным на рис. 4 (б). Измеренная нелинейность фазо-
вой характеристики ЛЗ в диапазоне $4,5 + 9$ МГц лежит в
пределах $+ 6^\circ$. Она обусловлена в основном конечной раз-
вязкой и неидеальностью согласования ответвителей. Соб-
ственный КСВН линий задержки, определяющийся неравно-
мерностью коэффициента деления ответвителя и неидеаль-
ностью его согласования, не превосходит уровня 1,3. Концы

отрезков двухпроводных линий, образующих шлейфы ЛЗ, заземлены и служат, таким образом, для электростатического заземления части полотна излучателей системы, не охваченной заземлением через фехралевые линии, а также для заземления системы питания рядов и фидеров, соединяющих антенные секции с передатчиками.

Развязанные делители мощности применены в системе питания рядов секции для подавления взаимосвязи между соседними рядами секции по питанию и улучшения согласования секции с передатчиками. Делитель выполнен в виде гибридного кольца с обращением фазы, в разностное плечо которого включена поглощающая фехралевая линия. В ней гасятся противофазные компоненты отраженных волн, приходящие с выходов делителя. Сопротивления нагрузок делителя равны 240 Ом, волновые сопротивления двухпроводных линий, образующих кольцо, равны 338 Ом. Частотно-независимый 180-градусный фазовый сдвиг в одной из сторон кольца, примыкающий к разностному входу, реализован скруткой двухпроводной линии. КСВН делителя близок к единице и лишь на краях диапазона возрастает до 1,2, коэффициент деления практически равен единице, развязка сопряженных входов превышает 30 дБ.

Многopроводные фидера с волновым сопротивлением 120 Ом, соединяющие выходы передатчиков со входами секций, выполнены из биметаллических проводников и подвешены на металлических опорах. Емкостные неоднородности, возникающие за счет опор, скомпенсированы последовательными индуктивностями в виде примыкающих к опорам участков фидера с повышенным волновым сопротивлением. Эта компенсация позволила снизить собственный КСВН фидеров до уровня менее 1,2.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ

Основные характеристики ФАР и одной ее секции при излучении в зенит, рассчитанные и измеренные для нескольких частот рабочего диапазона, приведены в табл. 1. Выбранные частоты являются разрешенными для передающего

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ФАР И ОДНОЙ ЕЕ СЕКЦИИ

Таблица 1

	f , МГц	$\Delta\theta_1^*$ $\Delta\theta_2$	КНД расчетн.	КНД	G рас- четн.	G этал. ант.	G измер	$R_{\text{прав.}}$ $R_{\text{лев.}}$ дБ
Вся решетка	4,785	$10^\circ \times 10^\circ$	305	0,66	201	6,7	200	14
	5,750	$8^\circ \times 8^\circ$	432	0,63	272	6,1	220	16,5
	7,815	$6^\circ \times 6^\circ$	772	0,59	455	4,5	315	19
	9,910	$5^\circ \times 5^\circ$	1072	0,57	611	3,4	380	21
Одна секция	4,785	$10^\circ \times 30^\circ$	109	0,66	72	6,7	67	
	5,750	$8^\circ \times 26^\circ$	150	0,63	95	6,1	72	
	7,815	$6^\circ \times 20^\circ$	259	0,59	153	4,5	100	
	9,910	$5^\circ \times 17^\circ$	351	0,57	200	3,4	125	

комплекса "Сура" и равномерно распределены по рабочему диапазону. Верхняя частота 9310 кГц несколько выходит за границы диапазона, однако согласование секций ФАР на этой частоте еще вполне удовлетворительное ($K_{\text{СВН}} < 2$). В столбцах 1 + 5 табл. 1 представлены расчетные значения ширины главного лепестка по уровню 3 дБ, коэффициента направленного действия (КНД), КПД (η) и коэффициента усиления (G) всей решетки и одной ее секции, а также расчетные значения коэффициента усиления эталонной антенны, которая была использована в измерениях G решетки. В столбце 6 приведены измеренные значения G решетки и ее секции, а в столбце 7 - значения поляризационной развязки, характеризующие потери мощности на излучение в паразитную круговую поляризацию.

Расчетный КНД определялся по диаграмме направленности решетки без учета искажений ее амплитудно-фазового распределения из-за взаимосвязей. В оценках η были учтены потери в антенно-фидерных трактах и в земле, потери обусловленные внутренними отражениями и асимметрией фи-

дерев в системах фазирования и питания ФАР, а также потери вследствие искажения амплитудно-фазового распределения по раскрыву ФАР. Измерения G проводились путем сравнения коэффициента усиления ФАР с коэффициентом усиления эталонной антенны. Блок-схема измерения приведена на рис. 5 (а). Исследуемой и эталонной антеннами принималось

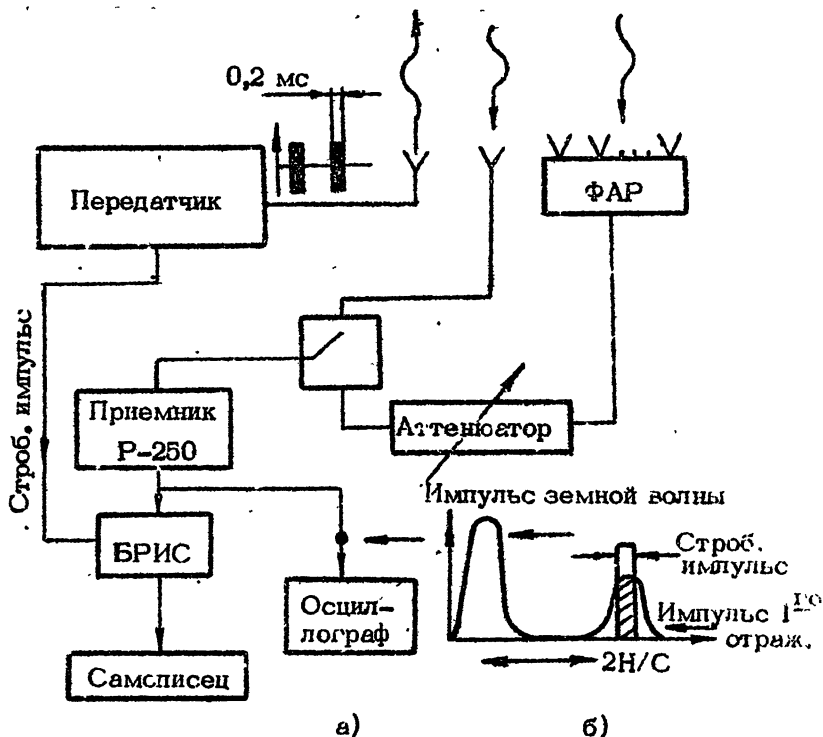


Рис. 5. Блок-схема измерения коэффициента усиления ФАР (а), и осциллограмма, индицирующая детектируемую часть импульса 1-го отражения (б).

импульсное радиоклучение наземного радиопередатчика, переотраженное ионосферой. При измерении G решетки, сфазированной в зенит, передающая и обе приемные антенны расположены в одном пункте. Передающей антенной служила синфазная четырехэлементная квадратная решетка

круговой поляризации. Мощность излучения в импульсе была около 200 кВт при длительности импульсов 200 мкс и частоте повторения 50 Гц. Приемный тракт включал калиброванный аттенюатор в канале исследуемой антенны, двухканальный коммутатор, приемник Р-250, блок регистрации импульсных сигналов (БРИС), самописец и осциллограф. Калиброванный аттенюатор служил для выравнивания амплитуд сигналов приемных антенн. С учетом поправок на разность потерь в трактах этих антенн уровень затухания аттенюатора дает превышение усиления исследуемой антенны над эталонной. БРИС, стоящий на выходе УПЧ приемника, служил для выделения импульсов первого отражения от ионосферы на фоне импульсов земной волны, переотражений высших порядков и помех. Совмещение стробирующих импульсов, задающих моменты отпираания БРИСа, с импульсами первого отражения от ионосферы контролировалось осциллографом. (рис. 5б). Стробирующие импульсы были синхронизированы с напряжением частоты модуляции передатчика. Разность потерь в трактах приемных антенн была измерена с точностью 0,2дБ с помощью генератора стандартных сигналов и высокочастотного вольтметра.

Эталонной антенной служил турникетный излучатель из двух полуволновых горизонтальных вибраторов, подвешенных на высоте 12 м над землей, экранированной металлической сеткой. Коэффициент усиления такого излучателя может быть рассчитан с высокой точностью.

Основная погрешность метода была обусловлена значительными вариациями амплитуд принимаемых сигналов со временем. Так как эти вариации особенно сильны были в утренние и вечерние часы, измерения проводились днем, когда ионосфера относительно "спокойна", а критические частоты значительно выше рабочих. Разброс результатов, усредненных по серии измерений, лежит в пределах 0,7 дБ. Суммарная погрешность метода по нашим оценкам составила 1 дБ. Расхождения между расчетными и измеренными значениями G , превышающие на верхнем краю диапазона погрешность измерения, можно связать, по-видимому, с провалом в парциальной диаграмме неправильности излучателя ФАР из-за эффекта взаимной связи, проявляющегося при уменьшении рабочей длины волны до величины, близкой

к периоду решетки.

Результаты измерения поляризационной развязки показывают, что потери мощности на излучение в паразитную круговую поляризацию составляют в среднем по диапазону 2%, что свидетельствует о близости поляризации излучения к круговой. Снижение развязки на нижнем краю диапазона связано с ухудшением согласования поглощающих линий поляризаторов с ростом длины волны и наличием отраженных волн на входах рядов ФАР, служащих нагрузками поляризаторов. В результате, имеет место частичное излучение этих отраженных волн в паразитную поляризацию.

Измерение согласования антенных секций проводилось непосредственно в точках их подключения к выходам передатчиков. Средний уровень КСВН в рабочем диапазоне составил $1,4 + 1,6$, а имевшие место отдельные выбросы не превысили 2. При сканировании луча уровень КСВН менялся слабо. Настройка передатчиков при достигнутом уровне согласования секций не вызывала затруднений.

Измерения коэффициента асимметрии проводились в различных участках системы питания ФАР. Наибольший уровень асимметрии был измерен на выходах поляризаторов ($\Delta = 13\%$, $\delta\varphi = 7^\circ$), что связано с возбуждением синфазной волны в областях связи поляризаторов и ЛЗ, имеющих значительные размеры поперечного сечения. Вблизи вибраторов коэффициент асимметрии значительно меньше ($\Delta \approx 5\%$, $\delta\varphi \approx 4^\circ$), что связано с излучением синфазной волны фидерами системы питания рядов. Коэффициент асимметрии, измеренный непосредственно на выходах передатчиков, составил в среднем $\Delta \approx 2\%$, и $\delta\varphi \approx 2^\circ$.

Измерение амплитудно-фазового распределения (АФР) в плоскости сканирования производится системой контроля АФР, блок-схема которой изображена на рис. 6. Принцип работы системы основан на поочередном подключении элементов связи, подвешенных на выходах поляризаторов, к общей коаксиальной линии, согласованной с обоими концами. Один конец коаксиальной линии соединяется через линию задержки переменной длины со входом амплифазометра. Электрическая длина участка линии между точкой подключения элемента связи и входом амплифазометра поддерживается постоянной, — ~~помощью линии задержки~~.

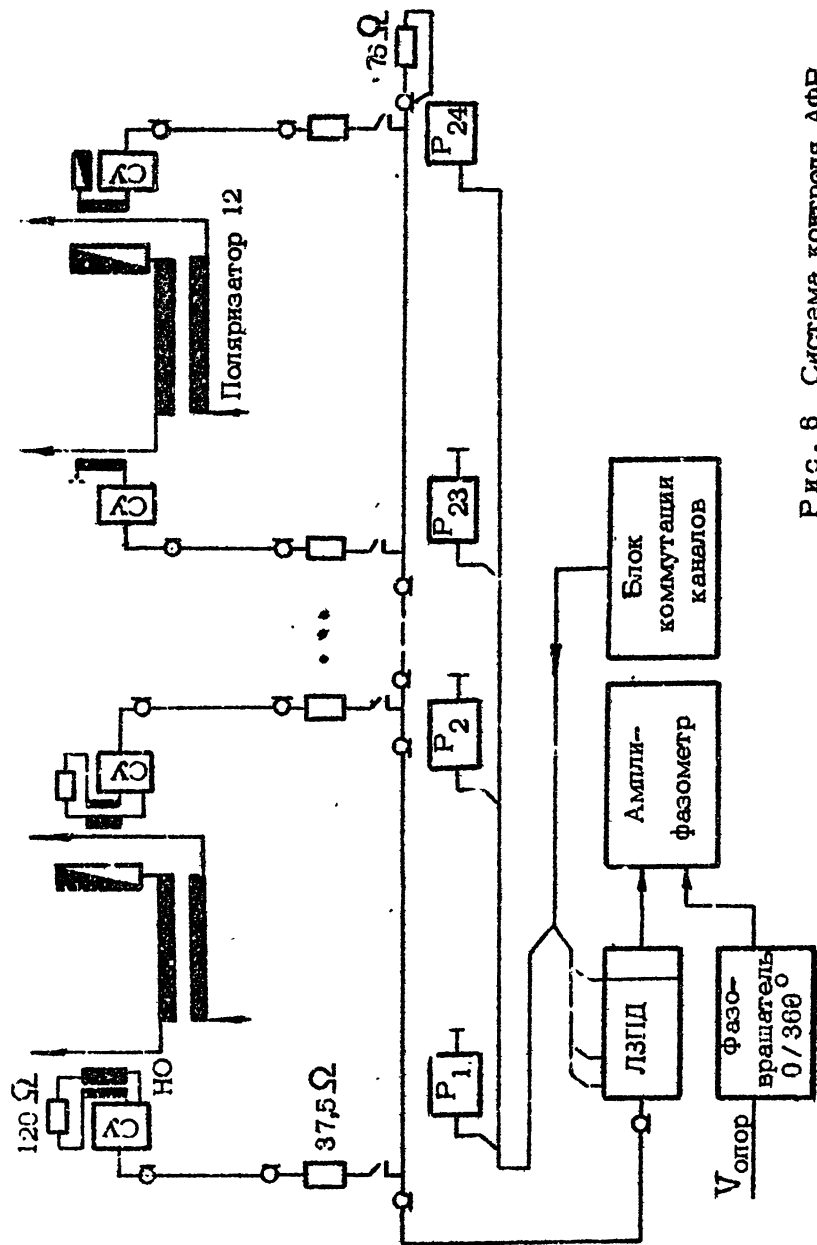


Рис. 6 Система контроля АФР

Элемент связи представляет собой двухпроводный направленный ответвитель со связью около 50 дБ и направленностью не хуже 20 дБ, соединяющийся с общей коаксиальной линией через симметрирующий трансформатор, короткий отрезок кабеля и согласующий резистор. Подключение элемента связи к линии производится высокочастотным реле.

Измерения АФР с помощью системы контроля, проводившиеся на разных частотах и для разных углов сканирования, показали, что дисперсия отклонений фазового распределения не превышает 20° при углах сканирования, близких к предельным и 12° в секторе сканирования $+ 20^\circ$. Соответственно, дисперсия отклонений амплитудного распределения лежит в пределах 25% на границах сектора сканирования и 15% в секторе $+ 20^\circ$.

Измерения АФР в плоскости рядов излучателей проводились с помощью переносного зонда выборочно для внутренних и периферийных рядов ФАР. Эти измерения дали дисперсию фаз и амплитуд не более 17° и 25%.

Ожидаемое снижение КНД решетки при измеренном уровне ошибок АФР составляет 0,4 дБ в секторе сканирования $+ 20^\circ$ и 0,7 дБ для предельных углов сканирования.

4. ПЕРЕДАТЧИКИ КОМПЛЕКСА И СИСТЕМА ФАЗИРОВАНИЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Передачики комплекса типа ПКВ-250 "Вьюга" размещены в общем здании. Номинальная выходная мощность одного передатчика составляет 250 кВт в режиме несущей и 300 кВт в режиме трапецеидальной модуляции, диапазон рабочих частот передатчиков $4 + 26$ МГц, число заранее выбранных частот автоматической перестройки равно шести, время перестройки на любую из этих частот не превышает 2 минут. Настройка передатчика на любую другую частоту диапазона, отличную от этих шести, производится вручную. Структурная схема передатчика представляет собой каскадное соединение противофазно-возбуждаемых широкополосных неэстраиваемых предусилителей и двухтактного резонансного усилителя. При изменении рабочей частоты необходи-

мая перестройка контуров и элементов связи резонансного усилителя производится электромеханическими сервисистемами. Амплитудная модуляция осуществляется по анодам ламп оконечного каскада. Выход передатчиков симметричный, выходное сопротивление равно 120 Ом.

Система фазирования передатчиков, структурная схема которой изображена на рис. 7, работает по принципу автоподстройки фаз (АПФ) выходных сигналов двух фазуемых передатчиков по фазе третьего, опорного передатчика. За опорный взят передатчик той крайней секции, которая соединяется с выходом передатчика самым коротким фидером. Это позволяет скомпенсировать разницу электрических длин фидеров между секциями и передатчиками линиями задержки, включенными в цепи обратной связи колец АПФ, а сигналы обратной связи снимать с направленных ответвителей выходных трактов передатчиков, а не со входов антенных секций. Кроме того, выбор передатчика крайней секции в качестве опорного открывает возможность совместной работы как пары соседних секций с уширенным лучом, так и крайних секций с трехлучевой диаграммой направленности.

Исполнительными устройствами в кольцах АПФ являются управляемые фазовращатели, включенные в возбудители фазуемых передатчиков по схеме, показанной на рис. 8, и работающие на частоте общего для всех возбудителей задающего кварцевого генератора 10 МГц. Изменения выходных фаз возбудителей $\Delta\varphi_{\text{вых}}$ для этой схемы пропорциональны фазовым сдвигам фазовращателей с коэффициентом пропорциональности, равным кратности умножения уменьшителя частоты, стоящего на выходе фазовращателя. Благодаря высокой кратности умножения (20) обеспечиваются высокая крутизна и линейность управляющей характеристики $\Delta\varphi_{\text{вых}} (U_{\text{упр}})$ в области возможных первоначальных фазовых расстройках $\pm \pi$, не зависящие от рабочей частоты передатчиков.

Напряжение ошибки подается в цепи управления фазовращателей с выходов аналоговых перемножителей через фильтры нижних частот и усилители постоянного тока. Поскольку коэффициент передачи перемножителей, выполняющих функции фазовых детекторов, пропорционален $U_1 U_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ ($U_{1,2}, \varphi_{1,2}$ — амплитуды и фазы входных сигналов

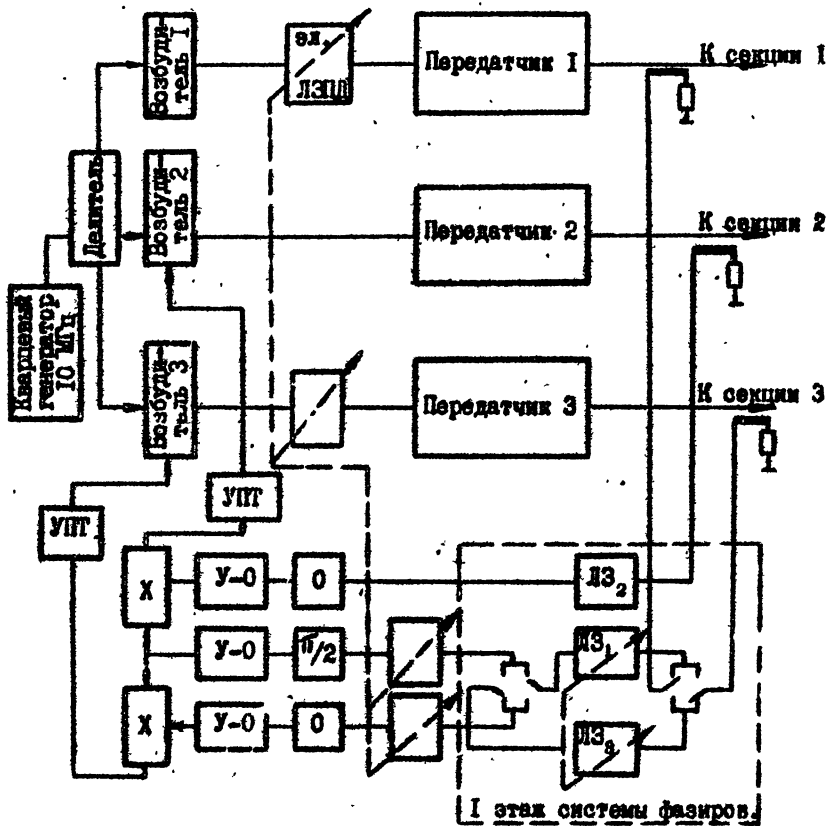


Рис. 7 Структурная схема системы фазирования передатчиков

перемножителей), на входах перемножителей включены фазостабилизирующие усилители-ограничители. Кроме того, перед усилителями-ограничителями включены широкополосные фазовые звенья, вносящие 90-градусный сдвиг в цепь обратной связи опорного передатчика, поскольку нулевая остаточная фазовая расстройка реализуется в кольце АПФ с нечетной характеристикой фазового детектора $U_{ФД}(\varphi_1 - \varphi_2)$.

В цепи обратной связи колец АПФ между фазовыми контурами и ответвителями включены четырехразрядные ЛЗ

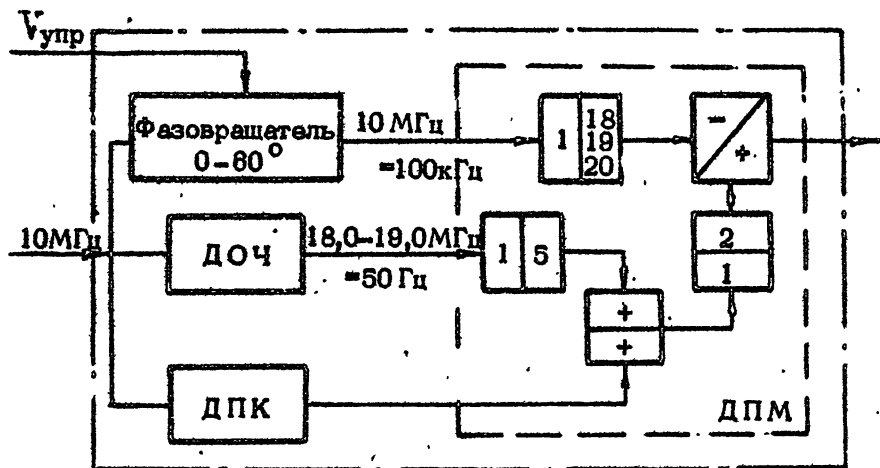


Рис. 8. Блок-схема возбуждителя с управляемым фазовращателем

первого этапа системы фазирования антенны, формирующие 21 луч в секторе сканирования, а также ЛЗ электрического сканирования. Длины ЛЗ первого этапа изменяются противофазно в пределах $0 + D/3 \sin 40^\circ$ и $2D/3 \sin 40^\circ + D/3 \sin 40^\circ$ для крайних антенных секций, длина ЛЗ₂ для средней секции постоянна и равна $D/3 \sin 40^\circ$ ($D^2 = 300$ м размер решетки в плоскости сканирования). Смена знака угла сканирования производится взаимной коммутацией ЛЗ первой и третьей секций. ЛЗ электрического сканирования на три состояния, соответствующие углам сканирования ($\theta_0 - 4^\circ$, θ_0 , $\theta_0 + 4^\circ$), включены в цепи обратной связи крайних

секций и работают в противофазе с такими же ЛЗ, включенными в прямые ветви колец АПФ на входах передатчиков крайних секций. В результате, фазовая модуляция выходных сигналов этих передатчиков подавляется на входах фазовых детекторов, и частота электрического сканирования не ограничивается постоянной времени колец АПФ, составляющей около 1,5 мксек. ЛЗ электрического сканирования выполнены на переключающих диодах.

Схема фазирования решетки в приемном режиме показана на рис. 9. В нее входят ЛЗ первого и второго этажей передающего режима, а также сумматоры $C_4 + C_5$ и линии задержки 1 и 21 трехканальной лучеобразующей матрицы, выходы которой соответствуют лучам $\theta_0 - 4^\circ$, θ_0 и $\theta_0 + 4^\circ$ диаграммы направленности, где θ_0 - угол, задаваемый ЛЗ первого и второго этажей системы фазирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс "Сура" вступил в строй в 1980 г., и в настоящее время является базовым инструментом для проведения исследований в области искусственного регулирования параметров ионосферы и ионосферного распространения радиоволн.

Большой потенциал передающего комплекса планируется использовать для исследования планет и короны Солнца радиолокационным методом.

Диапазонная антенна с большой эффективной площадью ($\sim 80000 \text{ м}^2$), обеспечивающая сканирование диаграммы направленности в широком секторе углов в плоскости магнитного меридиана и одновременную работу тремя лучами в приемном режиме, уже в настоящее время используется как радиоастрономический инструмент в длинноволновой (4-9 МГц) части декаметрового диапазона волн.

Создание комплекса "Сура" не могло бы успешно завершиться без упорного труда большого коллектива сотрудников НИРФИ, без участия ряда промышленных предприятий.

Авторы выражают глубокую признательность всем принимавшим участие в создании комплекса "Сура".

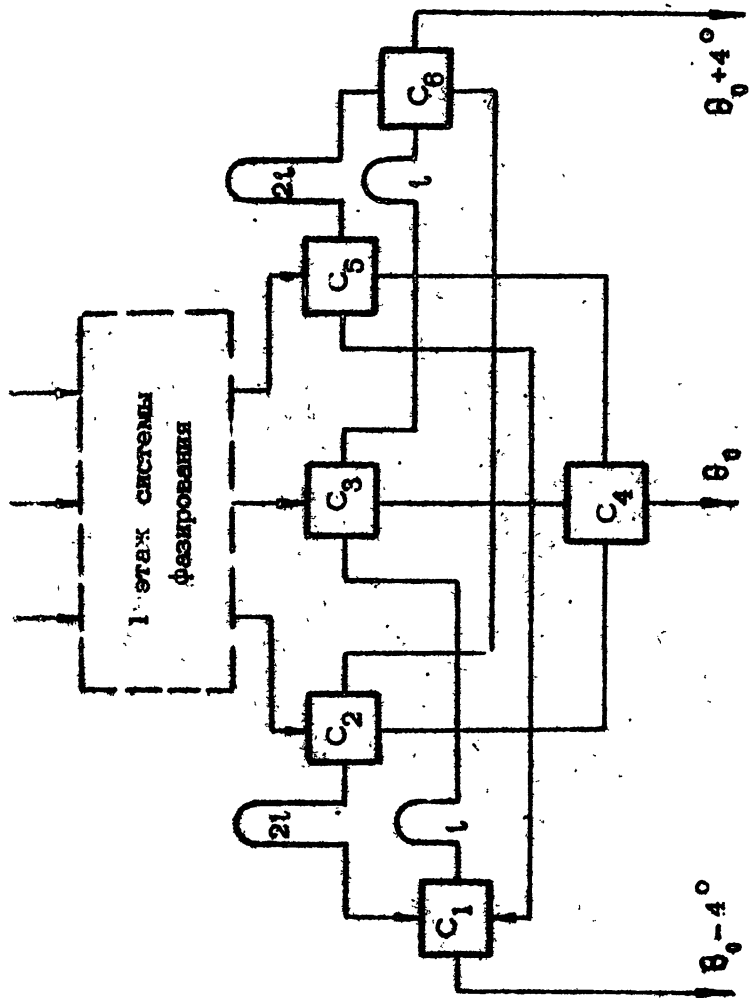


Рис. 9. Схема фазирования антенны в приемном режиме

ЛИТЕРАТУРА

1. Fialler P.A. - Radio Sci., 1974, v.9, N11, p. 923
2. Брухимов Л.М., Метелев С.А., Митякова Э.Е. и др. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
3. Грач С.М., Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. - В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. - Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 46.
4. Гетманцев Г.Г., Зуйков Н.А., Котик Д.С. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1974, т. 20, № 4, с. 229.
5. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Иткина М.А. и др. - Изв. вузов - Радиофизика, 1977, т. 20, № 12, с. 1821.
6. Stubbe P., Корка Н., Dowden R.L. - J. Geoph. Res., 1981, v.86, N11, p.9073.
7. Белов И.Ф., Бычков В.В., Глазман В.Н. и др. Тезисы докл. XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981, 129 с.

Дата поступления статьи

4 апреля 1983 г.

Иван Федорович Белов
Вячеслав Владимирович Бычков
Герман Григорьевич Гетманцев
Николай Анатольевич Митяков
Галина Робертовна Пашкова

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС "СУРА"
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ
ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ**

Подписано в печать 15.08.83. МЦ 24221. Формат 60x84 1/16.

Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 1,42 усл.пл.

Тираж 120 Заказ 2959 Бесплатно.

Отпечатано на ротационной машине Горьковского научно-исследовательского института. 603600, Горький ГСП-51, ул.Лядова, 25/14, т. 38-90-91, д. 5-08.