

УДК 551.510.535

КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ ИОНОЗОНДА АВГУР-Д

А.В. Кузьмин, В.М. Кучерина, А.Н. Ражев

Приводится описание ионозонда Авгур-Д и комплекса мониторинга ионосферы построенного на его основе. Рассмотрен круг решаемых задач, ожидаемые характеристики и особенности конструктивного исполнения. Обсуждаются перспективы использования комплекса в системе Росгидромета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ, ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ИОНОЗОНД, НАКЛОННОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, АДАПТИВНАЯ РАДИОСВЯЗЬ.

ВВЕДЕНИЕ

Успехи, достигнутые в создании антенных решеток (АР) КВ диапазона радиоволн, позволили по новому подойти к конструированию ионозондов. Ионозонд Авгур-Д, упомянутый в [1], в отличие от традиционных ионозондов использующих на передачу отдельную антенную систему, а на прием – АР, использует АР как на передачу так и на прием. Использование фазированной АР состоящей из 16-ти активных антенных элементов (ААЭ) позволяет снизить требования к излучаемой мощности получить при этом более высокие характеристики пространственного разрешения по сравнению с существующими ионозондами. Малые размеры легко переустанавливаемых ААЭ позволяют создавать АР нужной для решения конкретных исследовательских задач конфигурации при существенно меньшей критичности от площадки развёртывания, а также значительно снижают стоимость антенных систем и их дальнейшего обслуживания в ходе эксплуатации. При этом активный элемент (усилитель) входящий в ААЭ не только обеспечивает согласование при приеме информации, но и обеспечивает излучение зондирующих сигналов нужной мощности.

Наличие единой фазированной АР позволяет реализовать на ионозонде Авгур-Д кроме вертикального радиозондирования ионосферы (ВЗ) без дополнительной аппаратуры решение задач наклонного радиозондирования ионосферы (НЗ), приема сигналов ЛЧМ ионозондов, прямого и обратного трансionoсферного зондирования (ТИЗ и ОТИЗ), передачи и приема

телеметрической информации в КВ диапазоне. Что позволяет реализовать региональный мониторинг ионосферы с обеспечением работы адаптивной КВ радиосвязи.

Ниже рассматривается построение такого комплекса, приводятся его характеристики и особенности построения.

1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА

Структурная схема комплекса мониторинга на базе ионозонда Авгур-Д дана на рисунке 1.

Основными частями комплекса являются:

- антенная система;
- 32-канальное радиоприемное устройство (РПУ) и модулятор;
- промышленный компьютер ER-400;
- модуль приема сигналов ГЛОНАСС и GPS;
- ПЭВМ управления;
- модуль кодирования/декодирования телеметрической информации.

Антенная система, 32-канальное РПУ и модулятор, промышленный компьютер и модуль приема ГЛОНАСС и GPS являются штатной аппаратурой ионозонда Авгур-Д. Модуль кодирования/декодирования телеметрической информации, ПЭВМ управления и дополнительное программное обеспечение (ПО) расширяют возможности ионозонда.

Основные характеристики комплекса следующие:

- диапазон частот 1-30 МГц;
- излучаемая мощность 64 Вт;

- вид зондирующих сигналов задается программно (обеспечивается формирование и обработка от немодулированных импульсов до сигналов с непрерывной линейной частотной модуляцией (ЛЧМ));
- чувствительность РПУ -190 дБ/Вт/Гц;

- направление излучения и приема осуществляется программными средствами в пределах $0-360^\circ$ по азимуту и $0-90^\circ$ по углу места;
- диапазон обслуживаемых дальностей до 3500 км.

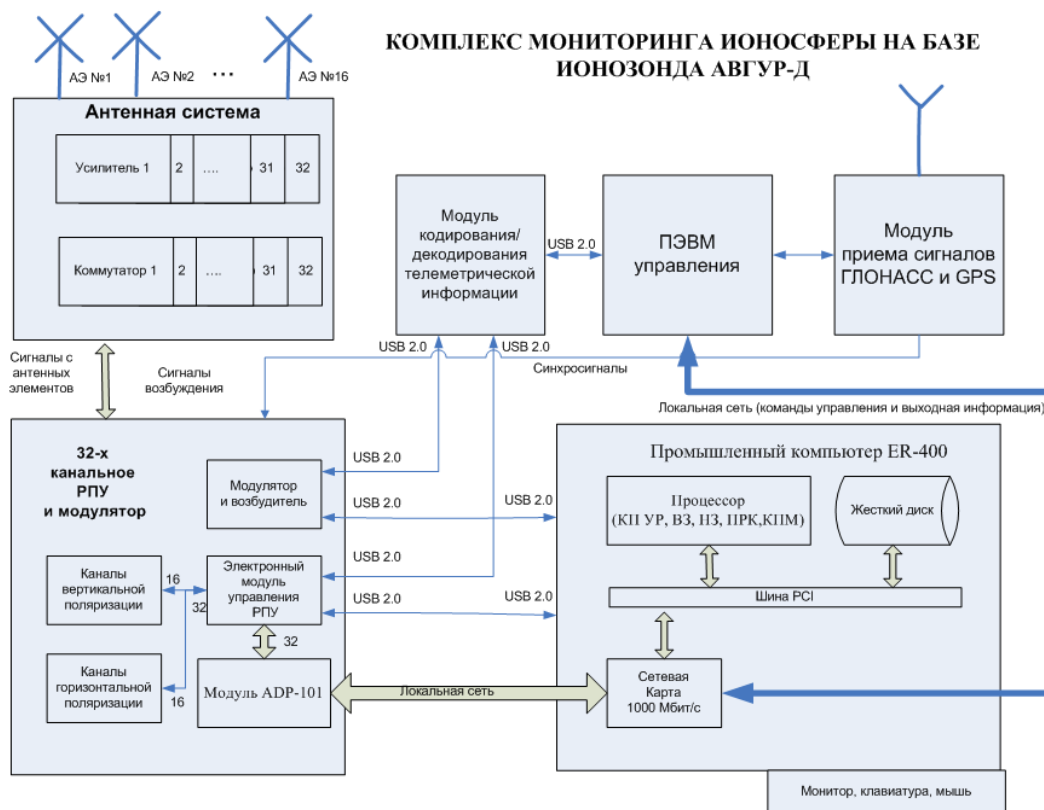


Рис. 1. Структурная схема комплекс мониторинга ионосферы на базе ионозонда «Авгур-Д».

Взаимодействие основных частей комплекса происходит следующим образом. ПЭВМ управления получив по локальной сети, каналу телеметрии или (и) от оператора список решаемых задач формирует временную диаграмму работы комплекса в соответствии с заданными приоритетами.

При наступлении времени события, соответствующего исполнению заданной задачи на ER-400 или модуль кодирования / декодирования выдаются команды включения соответствующего режима работы. Формируются кодограммы управления, которые далее выдаются на электронный модуль управления РПУ модулятор и возбудитель. В РПУ при точном (не более 1 мкс) совпадении времен исполнения задания включается соответствующий режим работы. Осуществляется излучение и (или) прием сигналов.

Принятая сигнальная информация поступает на модуль ADP-101, осуществляющий

процесс обнаружения и измерения параметров сигналов. Если заданы команды на измерение углов прихода в пределах обнаруженных сигналов формируется информация об амплитудах и фазах сигналов с каждого ААЭ, необходимая для оценки углов прихода, которая совместно с сигнальной информацией поступает по локальной сети на ER-400. В ER-400 выполняются процедуры автоматической обработки ионограмм ВЗ и НЗ с восстановлением вертикального профиля электронной концентрации (N(h)-профиля), при необходимости измеряются углы прихода сигналов.

Результаты обработки информации зондирования ионосферы по локальной сети передаются на ПЭВМ управления. В ПЭВМ управления реализована региональная модель ионосферы, корректируемая по результатам обработки сигналов ГЛОНАСС и GPS, данным ВЗ и НЗ ионосферы, данным обработки сигналов внешних источников ЛЧМ излучений.

Сервис ПО ПЭВМ управления позволяет адаптивно выбирать оптимальные частоты для работы различных радиотехнических систем, попадающих в зону обслуживаемого региона ($\sim 360^\circ \times 3500$ км).

Перечень задач решаемых комплексом следующий:

- вертикальное зондирование ионосферы;
- наклонное зондирование ионосферы;
- прием и обработка непрерывных ЛЧМ сигналов внешних ионозондов не входящих в систему;
- восстановление $N(h)$ -профиля по сигналам со спутников систем ГЛОНАСС и GPS;
- работа в режимах транссионосферного и обратного транссионосферного зондирования ионосферы при наличии информации о режимах работы спутников, поддерживающих эти режимы;
- передача и приём телеметрической информации по КВ каналу, включая организацию обмена информацией между комплексами Авгур-Д;
- автоматическое построение $N(h)$ -профилей по данным ВЗ и НЗ ионосферы;
- анализ помеховой обстановки и формирование списка частот для работы в режимах ВЗ, НЗ, передаче и приему информации по каналам КВ связи;
- создание региональной, корректируемой по данным текущих измерений модели ионосферы;
- частотное обеспечение адаптивных линий связи КВ диапазона.

Ниже обсуждаются элементы комплекса и особенности решения перечисленных задач.

2. АНТЕННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСА

Антенная система комплекса мониторинга включает АР из 16-ти двухполяризационных ААЭ и соединительных кабелей. Вид ААЭ дан на рисунке 2. ААЭ состоит из двух взаимно ортогональных активных антенн на основе симметричных укороченных вибраторов, складной стеклопластиковой мачты и двух интегрированных кабелей снижения. Усилитель расположен непосредственно на мачте, его энергообеспечение и съём сигнальной информации осуществляется по единому кабелю. В стандартном исполнении длина кабеля 300 м, высота ААЭ $\sim 4,5$ м длина плеча вибратора ~ 2 м. Установка одного такого элемента не

требует специальных приспособлений, монтаж и демонтаж занимают около 5 мин.

Создание такого ААЭ заняло в общей сложности более 10 лет. Основные сложности были связаны с обеспечением идентичности коэффициентов усиления по амплитуде и фазе. Пассивные элементы не могли обеспечить идентичность выше 3 дБ по амплитуде и 20-30° по фазе. Решения по оперативной калибровке не решали проблему из-за наличия перотражений и наведенных токов в фидерах, что обуславливало сильную частотную зависимость, неподдающуюся учёту. Для создания активного элемента отсутствовала надежная элементная база, что приводило к громоздкости конструкций, высокой стоимости и низкой надежности.



Рис. 2. Антенный элемент комплекса Авгур-Д.

Разработанные технологии на основе новой элементной базы позволили изготавливать ААЭ, которые имеют с учётом 300 м фидера по полю не идентичность не более ± 3 градусов по фазе и $\pm 0,3$ дБ по амплитуде, что позволяет строить высокоэффективные АР.

Коэффициент усиления ААЭ составляет ~ -10 дБ по отношению к полуволновому вибратору (ПВ) во всём диапазоне частот [2]. То есть ПВ при одной и той же потребляемой мощности создаёт поле напряжённостью в 3,16 раз большее, чем ААЭ. Если когерентно включить 2 ААЭ, то в направлении максимального излучения напряжённость поля удваивается. Для достижения того же эффекта для ПВ в нём

необходимо увеличить мощность излучения в 4 раза ($P=U^2/R$). Таким образом, энергию более эффективно собирать фазированной АР. При этом выигрыш составляет корень из N , где N – число ААЭ. Антенная решётка из 16 ААЭ позволяет повысить эффективность излучения на $10 \lg 16 = 12$ дБ, то есть примерно сравняться по своей эффективности с полуволновым вибратором. Если учесть, что АР получается в таком случае частотно независимой и достаточно компактной, то её применение позволяет решать большой круг задач, подвластных только громоздким системам. Значения коэффициента усиления АР, полученные по результатам испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициент усиления АР из 16-ти ААЭ.

Частота, МГц	$K_{ус}$ в азимутальной плоскости, дБ	$K_{ус}$ в вертикальной плоскости, дБ
1,5	11,1	9,8
5,0	11,6	10,3
10,0	11,9	10,8
15,0	12,4	11,1
20,0	12,9	11,4
30,0	13,2	11,6

Сравнительные испытания приёмной 16-ти элементной АР с антенной ЗБС2, показали, что при приеме сигналов с дальностей до 5 000 км, эти антенны сопоставимы, а СКО пеленгования сигналов в многолучевом поле при измерении азимутального и угломестного направления углов прихода сигналов не хуже 2° .

Следует отметить функциональную возможность адаптации данной фазированной АР к различным условиям площадки развёртывания, а именно: возможности учёта произвольной структуры построения антенной решетки (т.е. независимость от единственно определённого варианта размещения ААЭ), учёта перепадов высот установки антенных элементов и помеховых факторов за счет модернизации только программно-алгоритмического обеспечения, что позволяет легко адаптировать систему к классу решаемых задач.

3. АППАРАТУРА ПРИЁМА И ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

Вся аппаратура ионозонда «Авгур-Д» размещается в 2-х крейтах, встраиваемых в стандартную 19" стойку, где также предусмотрено место для модуля кодирования/декодирования телеметрической информации. ПЭВМ управления размещается отдельно на рабочем месте оператора. Вид 32-канального РПУ дан на рисунке 3.

РПУ является многоканальным приемником прямого усиления с аналого-цифровым преобразованием на рабочей частоте. Все каналы РПУ идентичны и обеспечивают полосу пропускания по уровню -3 дБ 20-500 кГц, аттенюацию в диапазоне до 30 дБ, динамический диапазон не менее 80 дБ, динамический диапазон по интермодуляционным составляющим 2-го и 3-го порядков не хуже 80 дБ, избирательность по соседнему каналу при отстройке ± 20 кГц 80 дБ, программное изменение частоты дискретизации на выходе цифровых фильтров в диапазоне 10^4 - 10^6 Гц.



Рис. 3. Внешний вид крейта 32-канального приемного устройства ионозонда «Авгур-Д».

Минимальный дискрет перестройки по частоте составляет 1 Гц. Неравномерность коэффициентов передачи приемных каналов после калибровки составляет не более $\pm 0,5$ дБ по амплитуде и $\pm 1^\circ$ по фазе.

Формирователь зондирующих сигналов в штатном режиме обеспечивает программное формирование зондирующих сигналов (ЗС) следующего вида:

- непрерывных ЛЧМ с частотной девиацией ± 10 и ± 20 кГц на периоде повторения;
- комплиментарных 16-значных кодов с фазовой манипуляцией при длительности дискрета 30 мкс.

Формирователь ЗС аналогичен используемому в ионозонде Парус-А [1]. Он является цифровым, что позволяет запрограммировать любой нужный зондирующий сигнал.

Обеспечивается разветвление ЗС на 32 канала с заданным амплитудно-фазовым распределением. Идентичность уровня сигналов формирователя в каналах не превышает $\pm 0,5$ дБ по амплитуде и ± 10 по фазе от заданных значений. Период повторения ЗС задается программными средствами и изменяется в пределах 5-100 мс с дискретом 10 мкс.

4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА

Структурная схема функционального программного обеспечения (ФПО) комплекса представлена на рисунке 4. В состав ФПО входят следующие комплексы программ (КП):

- управления работой средств зондирования (УР);
- пространственно-временной фильтрации и обнаружения сигналов (ПВФО);
- поиска рабочих каналов (ПРК);
- вертикального зондирования (ВЗ);
- наклонного зондирования (НЗ) и приема сигналов реперных источников радиоизлучений (ИРИ);
- приема и обработки спутниковых сигналов ГЛОНАСС и GPS (ПОСС);
- коррекции параметров модели ионосферы по данным измерений (КПМ);
- определения оптимальных частот для работы адаптивных радиотехнических систем (ОЧ АРС).

Комплекс программ управления работой средств зондирования обеспечивает автоматический приём команд и заданий по локальной сети или телеметрической линии связи, отображение результатов контроля работоспособности аппаратуры, управление работой средств ионосферного зондирования, формирование информации для работы передающей позиции наклонного зондирования ионосферы, выдачу кодограмм управления на электронный модуль управления РПУ по интерфейсу USB 2.0, прием сигнальной информации от КП ПВФО по локальной сети, измерение углов прихода сигналов, организацию интерфейса для формирования заданий и отображения служебной информации, формирование и выдачу результатов работы комплекса.

Комплекс программ ПВФО включает программные компоненты (ПК) пространственно-временной фильтрации (ПВФ), некогерентного

накопления (НН), обнаружения сигналов (ОС) и обеспечивает прием информации с приемных каналов от электронного модуля управления РПУ по интерфейсу ADMDIO 32, цифровое формирование диаграмм направленности для приема сигналов с требуемых направлений, свертку сигналов в соответствии с законом модуляции, быстрое преобразование Фурье (БПФ), детектирование и некогерентное накопление сигналов, поляризационную селекцию сигналов, обнаружение сигналов и измерение их параметров, формирование информации для измерения углов прихода обнаруженных сигналов, передачу полученной информации по локальной сети на КП УР.

Комплекс программ ВЗ включает ПК обнаружения и классификации ВЧХ (ОК ВЧХ), построения профиля электронной концентрации ионосферы (ПП) и решает задачи получения ионограмм ВЗ, выделения и классификации высотно-частотных характеристик (ВЧХ), автоматического построения профиля электронной концентрации ионосферы по данным ВЗ.

КП НЗ и приема сигналов реперных ИРИ включает ПК обнаружения время-частотных характеристик сигналов НЗ (О ВрЧХ), оценки параметров ионосферы на трассе НЗ (ОПИ). Он обеспечивает формирование ионограмм НЗ, обнаружение и классификацию время-частотных характеристик следов модов $1F_2$ и E_s , получения временных, доплеровских и фазовых характеристик сигналов НЗ, оценку параметров ионосферы на трассе НЗ.

Комплекс программ поиска рабочих каналов (КП ПРК) решает задачу поиска частот с минимальным уровнем активных помех в заданных частотных поддиапазонах. Он включает ПК выбора рабочего канала (ВРК) и банка данных ПРК.

Комплекс программ КПМ обеспечивает создание региональной модели ионосферы, расчета ВЧХ ВЗ, расчета ВрЧХ НЗ и коррекцию региональной модели ионосферы по данным сигналов со спутников, ВЗ и НЗ ионосферы. В его состав входят ПК модели ионосферы (МИ), расчета высотно-частотных характеристик (РВЧХ), расчета время-частотных характеристик (РВрЧХ), коррекции параметров модели ионосферы (КП).

Задание режима работы комплекса проводится по сети интернет, телеметрическому каналу связи или оператором. На рисунке 5 дан пример задания следующей последовательности работ: поиск частот для ВЗ (ПРК ВЗ), ВЗ,

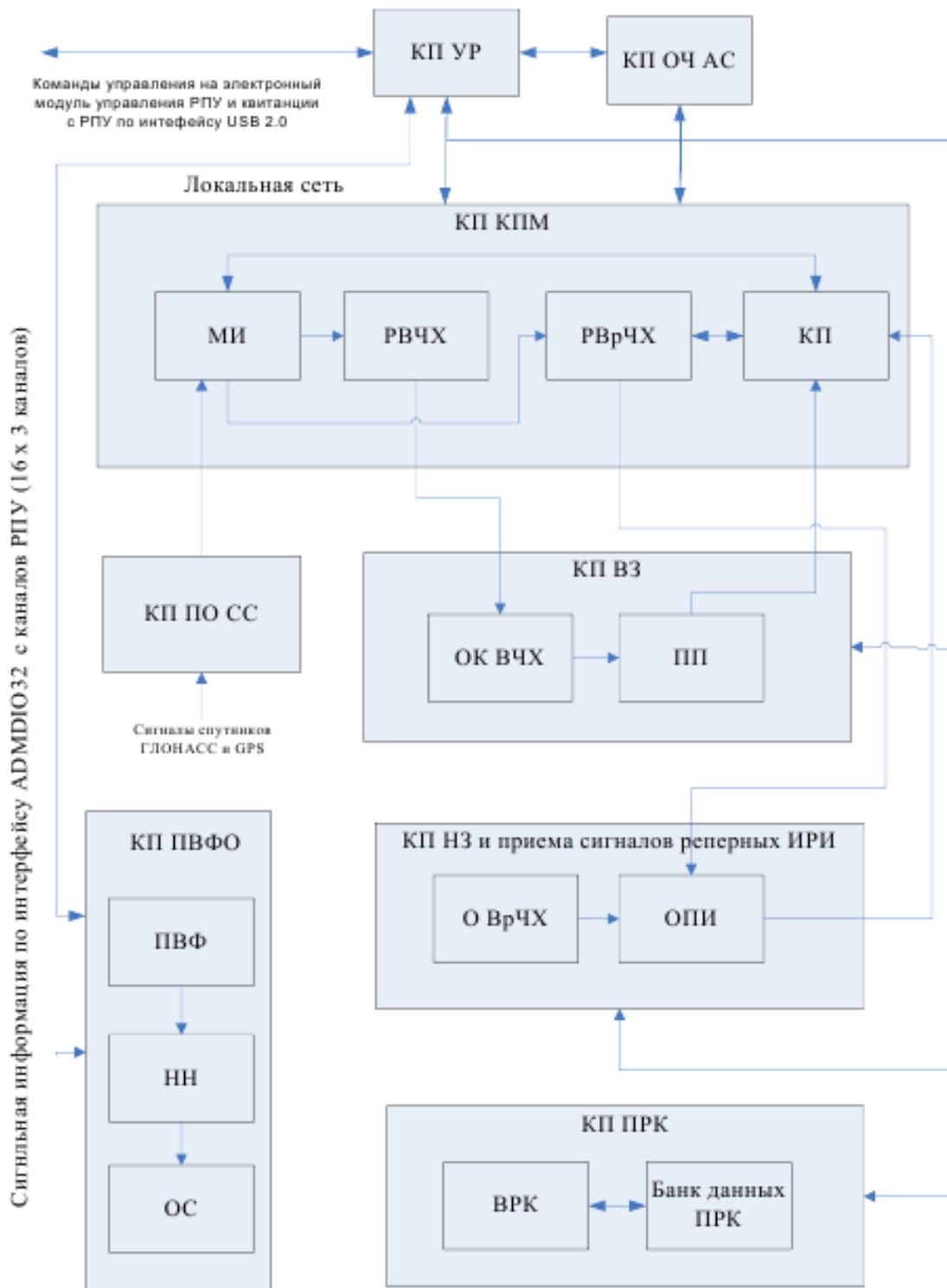
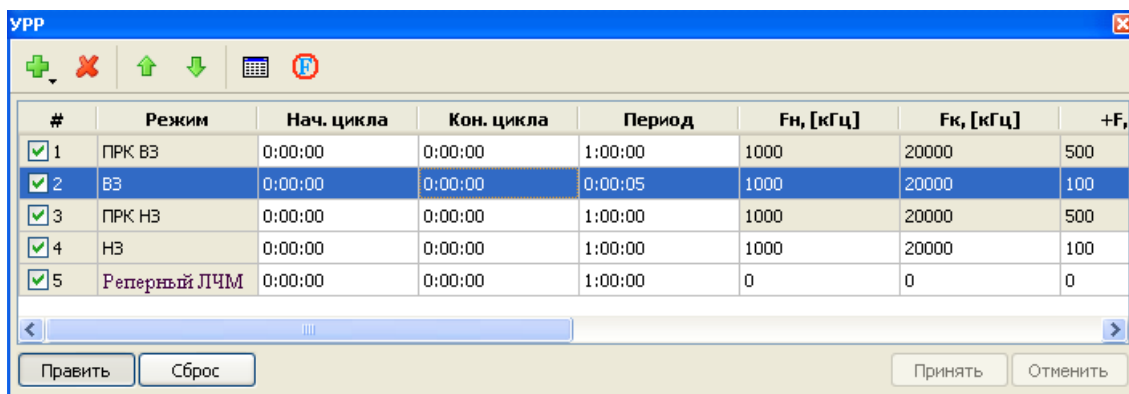


Рис. 4. Структурная схема ФПО комплекса.



#	Режим	Нач. цикла	Кон. цикла	Период	Fн, [кГц]	Fк, [кГц]	+F,
1	ПРК ВЗ	0:00:00	0:00:00	1:00:00	1000	20000	500
2	ВЗ	0:00:00	0:00:00	0:00:05	1000	20000	100
3	ПРК НЗ	0:00:00	0:00:00	1:00:00	1000	20000	500
4	НЗ	0:00:00	0:00:00	1:00:00	1000	20000	100
5	Реперный ЛЧМ	0:00:00	0:00:00	1:00:00	0	0	0

Рис. 5. Окно «Управление режимами работы».

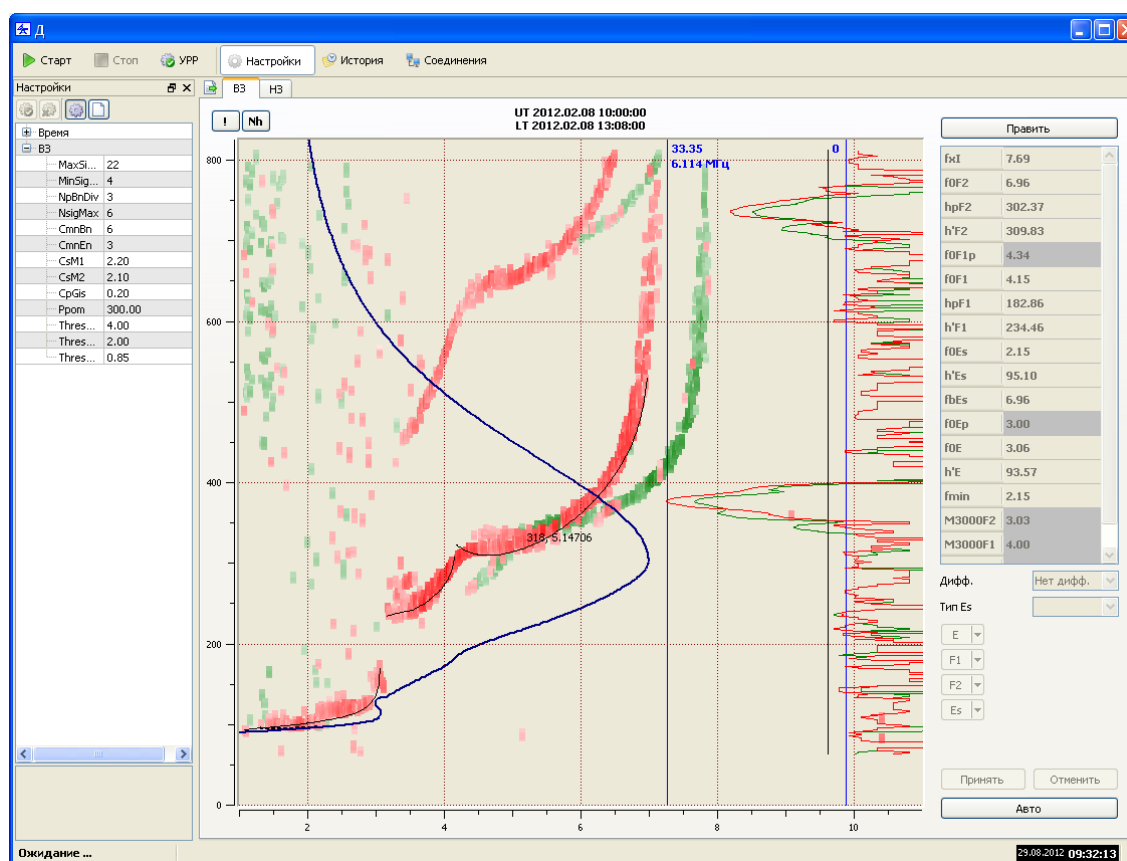


Рис. 6. Пример представления результатов работы комплекса при ВЗ.

поиск частот для НЗ (ПРК НЗ), НЗ, прием сигналов реперного ЛЧМ (Реперный ЛЧМ). Данное окно аналогично используемым в ионозондах Авгур-К и Парус-А, но включает расширенный набор режимов работы. Задается время начала и конца режима, период повторения и параметры. После получения задания комплекс автоматически начинает выполнять заданные режимы работы в последовательности определенной в таблице рисунка 5.

На рисунке 6 показан пример представления результатов обработки данных ВЗ, полученный по результатам записи сеанса ВЗ на

ионозонде Парус-А. В верхней части размещаются кнопки управления, имеющие следующие назначение:

- «Старт» – запуск работы ионозонда в соответствии с заданными режимами работы;
- «Стоп» – останов работы ионозонда;
- «УРР» – вызов окна таблицы «Управление режимами работы»;
- «Настройки» – вызов окна таблицы настроек режимов обработки;
- «История» – вызов окна истории операций;
- «Соединения» – отображение состояния сетевых и USB соединений.

Ниже располагаются три окна: первое для отображения служебной информации, второе отображает ионограммы ВЗ (НЗ) с результатами выделения ВЧХ (тонкие черные линии, пунктир для Es) и построения N(h)-профиля (толстая черная линия), в правой части можно отобразить АВХ ВЗ по каналу обыкновенной (красная линия) и необыкновенной (зеленая линия) составляющих, третье в правой части экрана с параметрами ионосферы определенными в результате ВЗ. Это окно может быть использовано для снятия или коррекции параметров ионограммы в ручном режиме.

Пример результатов работы программы коррекции параметров модели ионосферы показан на рисунке 7. На рисунке различной цветовой гаммой шкала которой указана в левом нижнем углу отображено распределение критической частоты слоя F2 в радиусе 3000 км от точки установки ионозонда Авгур-Д. В правом нижнем углу даны значения критической частоты и высоты максимума ионизации для

точки географические и полярные (относительно точки установки ионозонда) координаты которой указаны в строке под рисунком.

Промежуточный результат работы программы определения оптимальных частот для работы адаптивных радиотехнических систем в виде возможных вариантов распространения лучей с соответствующими энергетическими потерями дан на рисунке 8. На рисунке показаны возможные траектории распространения радиоволн между точкой передачи (ПРД) и приема (ПРМ), указаны дата и время для которого выполнен расчет. Индексы Rz и IG = -1, что соответствует их выбору по текущей модели ионосферы. Указаны координаты расположения комплекса (Широта опорн., Долгота опорн.).

В таблице, расположенной в правом углу даны номер траектории, признак ее классификации, углы излучения и приема, ожидаемое отношение сигнал/помеха и вероятность выполнения РТС своих функций.

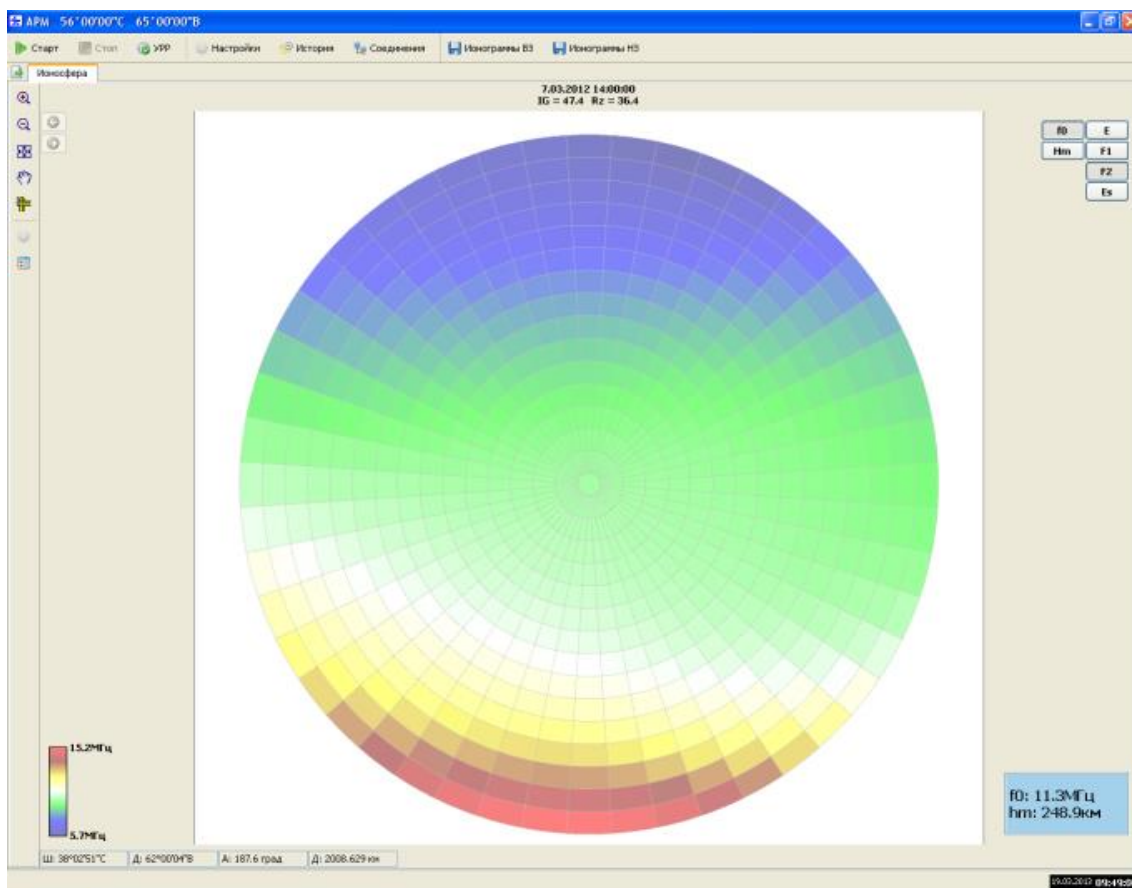


Рис. 7. Пример отображения значений критической частоты слоя F2 в зоне после проведения коррекции параметров модели ионосферы.

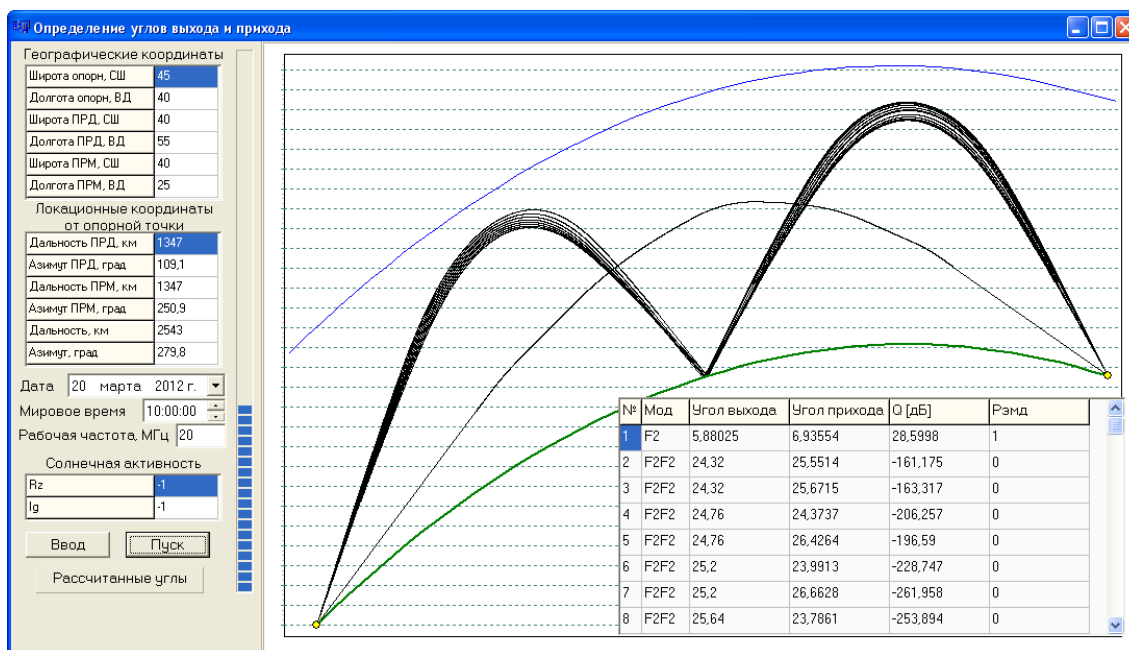


Рис.8. Пример расчета возможных траекторий распространения лучей при поиске оптимальных частот для адаптивных РТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершены разработка и изготовление ионозонда нового поколения. По сравнению с отечественными и зарубежными аналогами комплекс имеет уникальную приемно-передающую АР, характеристики которой позволяют осуществлять наряду с традиционным вертикальным зондированием ионосферы и наклонное зондирование. В зависимости от решаемых задач АР может быть оперативно переконфигурирована.

Дооборудование ионозонда дополнительными вычислительными средствами и про-

граммным обеспечением позволяет создать комплекс диагностики ионосферы методами спутниковой томографии, ВЗ, НЗ приема сигналов реперных источников ЛЧМ излучения, ТИЗ, ОТИЗ. Комплекс способен принимать и передавать данные по собственному каналу адаптивной КВ связи. Он обеспечивает получение региональной корректируемой по данным диагностики модели ионосферы и осуществлять выбор оптимальных частот для работы адаптивных КВ РТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Средства вертикального радиозондирования ионосферы. А.С. Канаев, А.В. Кузьмин, 2012.
2. Антенны. С.И.Надеенко, «Радио и связь», М. 1959.