



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСЗФ СО РАН,  
чл.-корр. РАН

А.В. Медведев

10 июня 2022 г.

## Акт

### о приемке работ по модернизации Иркутского радара некогерентного рассеяния

В соответствии с приказом директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) от 02.06.2022 г. № 98 комиссия в составе: председателя Хахинова Виталия Викторовича, заместителя директора по научной работе и инновационной деятельности ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.

и членов:

Куркина Владимира Ивановича, заведующего отделом физики околоземного космического пространства ИСЗФ СО РАН, д.ф.-м.н.;

Логовского Алексея Станиславовича, генерального конструктора ОАО "РТИ им. академика А.Л. Минца", д.т.н.;

Мингариева Рашида Камбаровича, начальника отдела технического сопровождения (РЛК «Воронеж», Иркутск) ОАО "РТИ им. академика А.Л. Минца";

Кушнарева Дмитрия Сергеевича, старшего научного сотрудника ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.;

Лебедева Валентина Павловича, старшего научного сотрудника ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н.;

Заворина Алексея Видинеевича, заведующего обсерваторией радиофизической диагностики атмосферы ИСЗФ СО РАН;

провела приемку работ по модернизации уникальной научной установки (УНУ) Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР).

По результатам приемки комиссия установила следующее.

#### 1. Иркутский радар некогерентного рассеяния

ИРНР является единственной в России УНУ, созданной на базе оборудования радиолокационной станции (РЛС) «Днепр». ИРНР представляет собой моностатическую, импульсную РЛС с частотным сканированием. Диапазон рабочих частот радара: 154–162 МГц, пиковая мощность, достигаемая на двух передатчиках: 2.8 МВт, длительность зондирующего импульса: от 70 до 900 мкс, частота его следования 24.4 Гц, коэффициент усиления антенны около 35 дБ. Главное отличие ИРНР от других радаров подобного профиля заключается в особенностях конструкции антенны, позволяющей одновременно проводить измерения ионосферных параметров методом некогерентного рассеяния (НР) и координатных и некоординатных характеристик космических объектов (КО).

В 2017 г. был завершен очередной этап комплексной модернизации большинства систем ИРНР, подтвержденный соответствующим актом.

#### 2. Задачи модернизации

Развитие диагностических возможностей ИРНР в период 2019–2021 гг. было связано с модернизацией управляющего и приемно-регистрирующего комплекса (УПРК), с целью повышения точностных характеристик и наиболее полного использования потенциала ИРНР. Основной задачей нового этапа модернизации стало обеспечение следующих возможностей ИРНР:

1. Повышение точности и надежности измерения координатной и некоординатной информации наблюдаемых КО.

2. Детальный анализ формы принятого сигнала в реальном масштабе времени в экспериментах по измерению параметров ионосферы методом НР и контролю КО.

3. Оперативное получение, отображение и дальнейшая передача потребителям, как ионосферных параметров НР ( $N_e$ ,  $T_e/T_i$ ), так и параметров КО в реальном масштабе времени.

Для реализации поставленной задачи в УПРК ИРНР были созданы:

- новая приемно-регистрационная система;
- программно-аппаратный вычислительный комплекс;
- система отображения.

Созданная приемно-регистрационная система, в рамках решения задачи повышения точности измерения координатной и некоординатной информации наблюдаемых КО, обладают следующими особенностями:

- Повышение стабильности, идентичности и надежности блоков входного тракта, за счет перехода на современную элементную базу, согласование с приемником прямого преобразования сигнала (уход от супергетеродинной схемы). Основные блоки нового приемника – 2 каскада малошумящих усилителей, полосовые фильтры и ключи управления, что дало возможность обеспечить необходимую форму АЧХ/ФЧХ каналов, их идентичность и стабильность.

- Улучшенная система защиты входных цепей от мощных высокочастотных входных помех, на базе согласующих П-фильтров, разрядников и современных рpn-диодов, позволила исключить выход из строя блоков усилителей.

- Система управления приемными устройствами позволяет в реальном времени контролировать и фиксировать их параметры (токи, напряжения, аварии и тд.).

- Проложена новая 4-х канальная фидерная линия с низким коэффициентом затухания – не более 1.186 дБ/100м на частоте 200 МГц.

- Для регистрации принимаемых сигналов использованы цифровые многоканальные приемные устройства прямого преобразования (DDC4) фирмы АО «ИнСис», которые позволяют регистрировать сигналы на несущих частотах ИРНР (154—162 МГц). Основные параметры DDC4 приведены в таблице 1. Приемники DDC4 построены на базе микросхем программируемой логики (FPGA) и имеет широкие возможности по перепрограммированию и настройке под задачи специализированных экспериментов.

- Разработана и испытана первая очередь системы калибровки излучаемых радиолокационных сигналов, позволяющая калибровать инструментальные задержки и разности фаз между каналами в масштабе реального времени в специализированных экспериментах по наблюдению КО.

- Новые DDC4 имеют расширенную полосу приема (до 10 МГц) и возможность регистрации непрерывных (длинных) разверток сигнала в специализированных экспериментах, что позволяет проводить более детальный анализ формы принятого сигнала, например ЛЧМ-модуляции или коротких импульсов. Для приемника DDC4 разработан новый блок опорного сигнала 200 МГц, позволяющий существенно повысить качество сигнала тактирования для АЦП.

- Дополнительный комплект приемно-регистрационного оборудования подключенный к второму выходу антенной системы ИРНР (южный конец) позволит увеличить сектор сканирования ИРНР в специализированных экспериментах.

Таблица 1. Параметры системы цифрового приема DDC4

Параметр	Значение
Число каналов АЦП	4, независимые
Число каналов DDC	4
Разрядность АЦП	16 бит
Тип микросхемы DDC	FPGA
Системная шина	PCIe 8x
Частотный диапазон входных сигналов	до 200 МГц
Максимальная частота дискретизации АЦП	250 МГц
Входное сопротивление	50 Ом
Динамический диапазон свободный от паразитных составляющих (SFDR), для 121 МГц	84 дБ
Отношение сигнал/шум (SNR), для 121 МГц	70 дБ
Входной диапазон	$\pm 0.65 \text{ В} \pm 10\%$
Внешний старт и синхронизация	есть
Поддержка ОС	Windows, Linux

Созданный программно-аппаратный вычислительный комплекс позволяет:

- регистрировать и хранить большие объемы первичных данных;
- фильтровать данные ИР от внешних помех и КО;
- в практически реальном масштабе времени (с накоплением 10-15 мин) получать ионосферные параметры ИР (профиль электронной концентрации, температуры электронов и ионов);
- обрабатывать РЛ сигналы, получать координатную и некоординатную информацию КО, проводить идентификацию результатов измерений по локальной базе КО в реальном масштабе времени с использованием алгоритмов параллельной обработки на GPU;
- рассчитывать и учитывать ионосферные и тропосферные поправки к измеряемой координатной и некоординатной информации наблюдаемых КО;
- отправлять информацию о сопровождаемых КО внешним потребителям в реальном времени;
- проводить пассивные наблюдения за космическими радиоисточниками в автоматическом режиме.

Применение GPU в новом программно-аппаратном комплексе позволило ускорить алгоритм обработки принятых РЛ сигналов и повысить его помехозащищенность. В результате значительно увеличилось: количество наблюдаемых КО, длительность их сопровождения и точность измеренных параметров.

В всех экспериментах на ИРНР требуется оперативное отображение параметров оборудования радара, текущих данных ИР и КО. Для решения этой задачи была создана система отображения, которая состоит из 6 мониторов и микрокомпьютеров на базе Raspberry Pi с установленной ОС Linux и браузером. Каждый из этих шести экранов выводит определенный вид информации:

- Контроль за техническим состоянием и параметрами основных блоков радара позволяет выводить текущий режим и мощность передатчиков, работоспособность и аварии приемных устройств и блока привязки GPS, коэффициент корреляции между полурупорами ИРНР, состояние дискового массива и метеосостояние.

- Отображение текущих параметров ионосферы: профиля мощности и  $N_e$ , отношения сигнал/шум, температур  $T_e$  и  $T_i$ .

- Отображение спутниковой информации: расписания КО, вывод координатных и некоординатных параметров (дальность, углы, амплитуда и тд.) наблюдаемых КО в реальном времени, параметров оптических средств в совместных экспериментах.

### 3. Результаты модернизации ИРНР

В таблице 2 приведены основные сравнительные характеристики модернизированного УПРК и предыдущего варианта комплекса.

Таблица 2. Характеристики модернизированного УПРК

	предыдущий УПРК	новый УПРК
Коэффициент шума первого каскада приемника, дБ	0.53	0.45
Затухание фидерного тракта, дБ/100м, на частоте 160 МГц	8	1.186
Регистрация сигнала на несущей частоте	нет	есть
Регистрируемая дальность вдоль луча, км	до 1200 в стандартном режиме ИР, до 4500 в специальных режимах	до 2000, в специальных режимах - непрерывно
Полоса пропускания аналоговой части приемного тракта	600 кГц	10 МГц
Полоса пропускания цифрового приемника	произвольная, до 1 МГц	произвольная, до 10 МГц
Получение параметров КО в реальном времени с помощью GPU	нет	есть
Получение параметров ионосферы в реальном времени	нет	есть
Система отображения состояния радара	частично	есть
Программная настройка параметров приемника	частично	есть

#### 4. Примерная стоимость установленного оборудования

Таблица 3. Примерная стоимость оборудования модернизированного УПРК

	Стоимость, тыс. руб.
Аналоговые блоки новых приемных устройств	407,369
Цифровые приемные устройства	1 928,232
Вычислительный комплекс и GPU	221,000
ВЧ-фидер 4 канала	808,300
Система отображения	114,097
Итого:	3 478,998

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ КОМИССИИ:

1. В результате проведенных работ по модернизации УПРК существенно возросли диагностические возможности ИРНР.

2. Достигнутые диагностические возможности позволили разработать новые методы наблюдений и методики измерений ионосферных параметров и орбитальных характеристик КО.

3. Антенная система и передающие устройства радара не требуют модернизации и позволяют успешно работать при постоянной профилактике отдельных их блоков или их замене изделиями, выпускаемыми отечественной промышленностью.

4. Объем работ и достигнутые характеристики говорят о глубокой модернизации ИРНР. Объем и стоимость установленного новых комплексов, систем и устройств позволяют отсчитать средний возраст дорогостоящего оборудования УНУ ИРНР с 2021 года.

Председатель комиссии

 Хахинов В.В.

Члены комиссии:

 Куркин В.И.

Логовский А.С.

 Мингариев Р.К.

Кушнарев Д.С.

 Лебедев В.П.

Заворин А.В.