УДК 550.837.76, 537.86
DOI: 10.12737/szf-33201708

Поступила в редакцию 01.06.2017
Принята к публикации 21.06.2017

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

MODERNIZATION OF THE IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR

Д.С. Кушнарев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, ds_k@iszf.irk.ru

В.П. Лебедев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, lebedev@iszf.irk.ru

В.В. Хахинов
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, khakhin@iszf.irk.ru

С.Е. Евстифеев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, e-serg@iszf.irk.ru

В.Е. Заруднев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, zarudnev@iszf.irk.ru

D.S. Kushnarev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, ds_k@iszf.irk.ru

V.P. Lebedev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, lebedev@iszf.irk.ru

V.V. Khakhinov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, khakhin@iszf.irk.ru

S.E. Evstifeev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, e-serg@iszf.irk.ru

V.E. Zarudnev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, zarudnev@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты модернизации управляющего и приемно-регистрирующего комплекса Иркутского радара некогерентного рассеяния. Работы были проведены в рамках выполнения и по результатам космических экспериментов «Плазма—Прогресс» и «Радар—Прогресс» с привлечением транспортных грузовых кораблей серии «Прогресс». В результате модернизации повысилась точность радиолокационных измерений низкоорбитальных космических аппаратов, например, при отношении сигнал/шум, равном 10, точность измерений дальности составляет 100–300 м, углов — 1–5 угл. мин.

Ключевые слова: радиолокация, Иркутский радар некогерентного рассеяния, космические эксперименты «Плазма—Прогресс» и «Радар—Прогресс».

Abstract. We present the results of modernization of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar's control and acquisition system. The modernization was carried out using results of space experiments "Plasma—Progress" and "Radar—Progress" involving Progress cargo spacecraft. The modernization has improved the accuracy of radar measurements of low-orbit spacecraft. For example, with a signal-to-noise ratio equal to10, the accuracy of range and angle measurements is 100–300 m and 1–5 arc min.

Keywords: radar, Irkutsk Incoherent Scatter Radar, "Plasma—Progress" and "Radar—Progress" space experiments.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач космических экспериментов (КЭ) «Плазма—Прогресс» (2007–2009 гг.) [http://www.energia.ru/rus/iss//researches/geophis-13.html; Lebedev et al., 2008; Potekhin et al., 2009] и «Радар—Прогресс» (2010–2015 гг.) [http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment_q.aspx?idE=183; Хахинов и др., 2013] заключалась в проведении анализа влияния выхлопных струй бортовых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) на радиооблик низкоорбитального космического аппарата (КА) путем сопоставления отражательных характеристик транспортных грузовых кораблей (ТГК) «Прогресс» при работающих и неработающих двигателях. Отличительной особенностью КЭ является слабое воздействие выхлопных газов (масса продуктов сгорания от 2 до 11 кг) на ионосферу.

Измерения отражательных характеристик ТГК «Прогресс» проводились на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) [Жеребцов и др., 2002; Лебедев и др., 2013]. За время проведения КЭ было выполнено несколько этапов модернизации управляющего и приемно-регистрирующего комплекса (УПРК) ИРНР с целью совершенствования методик получения и обработки координатных и отражательных характеристик КА.

Сеансы КЭ проводились на этапе автономного полета ТГК серии «Прогресс» после отстыковки от МКС. Во время пролетов ТГК «Прогресс» в зоне ответственности ИРНР включались бортовые ЖРД. От сеанса к сеансу варьировали направление истечения выхлопной струи, направление освещенности факела ЖРД Солнцем и направление скорости струи относительно вектора магнитного поля Земли. Одновременно с параметрами создаваемых ионосферных возмущений регистрировались и фоновые невозмущенные значения параметров ионосферы на трассе зондирования.

1. ИРКУТСКИЙ РАДАР НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Иркутский радар некогерентного рассеяния является единственной в России уникальной научной установкой, созданной на базе оборудования радио-

локационной 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 следования импульса — 24.4 Гц; коэффициент усиления антенны — около 35 дБ. Главное отличие ИРНР от других радаров подобного профиля заключается в особенностях конструкции его антенны.

2. ЭТАПЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

2.1. Особенности модернизации УПРК до 2008 г.

Развитие диагностических возможностей ИРНР в период 2003–2008 гг. было связано с коренной модернизацией всего комплекса управляющих, приемных, регистрирующих устройств и средств обработки сигналов с целью наиболее полного использования потенциала радара и особенностей конструкции его антенны. Основной задачей модернизации стало обеспечение следующих возможностей радара:

1) измерения параметров ионосферной плазмы одновременно в нескольких направлениях для исследования ее пространственно-неоднородной структуры;

2) одновременные измерения без амплитудных искажений мощных сигналов от КА или когерентного эха на фоне слабых сигналов некогерентного рассеяния;

3) управление формой диаграммы направленности (ДН) антенной системы и проведение интерферометрических измерений;

4) автоматическое определение наличия на радиолокационной развертке когерентных сигналов с возможностью принятия автоматического решения об изменении режима работы;

5) повышение пространственного разрешения и расширение высотного диапазона ионосферных измерений путем использования оптимальных зондирующих сигналов и устранения с радиолокационной развертки сигналов от местных предметов;

6) регистрация на электронные носители полного объема первичной информации зондирования для обеспечения выбора способа вторичной обработки, адекватного меняющимся задачам и природным условиям;

7) обработка большого массива данных ионосферного и спутникового зондирования.

Реализация поставленных задач потребовала создания нового УПРК, в состав которого вошли

- многоканальное приемное устройство;
- цифровая система синхронизации и формирования рабочих частот;
- система автоматического фазирования передатчиков;
- система регистрации формы излученного импульса;
- быстродействующее устройство регистрации сигналов и управления радаром;
- распределенная вычислительная система вторичной обработки данных зондирования.

В таком виде УПРК использовался во всех экспериментах, проводившихся на ИРНР в 2007–2012 гг. [Потехин и др., 2008].

2.2. Особенности модернизации УПРК для КЭ «Радар—Прогресс»

С началом проведения первых сессий КЭ «Радар—Прогресс», а также для решения современных задач по наблюдению КА были сформулированы новые требования к действующему УПРК:

- точность привязки к единой шкале времени — не хуже 1 мкс;
- использование цифровых приемных устройств с полосой приема до 1 МГц, динамическим диапазоном 60 дБ, линейной и высокостабильной фазочастотной характеристикой приемного тракта в требуемой полосе приема, программируемым коэффициентом усиления;
- возможность формирования сложных зондирующих сигналов и их последовательностей.

Для решения поставленных задач в УПРК ИРНР необходимо было выполнить следующие работы:

- интегрирование в систему управления высокоточного GPS-приемника;
- применение современных микросхем синтезаторов радиочастот, позволяющих программно задавать длительности, частоты, виды манипуляции зондирующих сигналов (АМ, ФМ, ЛЧМ);
- модификация блока управления для работы с GPS-приемником и новыми синтезаторами;
- применение современных цифровых приемных устройств для расширения динамического диапазона и обеспечения линейности ФЧХ приемного тракта;
- исключение «лишних» аналоговых блоков, таких как умножители на 8 и блок приема на второй промежуточной частоте;
- внедрение в вычислительный комплекс ИРНР возможности обработки в режиме реального времени принятых сигналов, отраженных от КА.

Начиная с сессий КЭ 2011 г. проводилось внедрение нового цифрового приемника (Digital Down Converter, DDC) и новой системы привязки к единой шкале точного времени. Цифровой приемник представляет собой отдельную систему регистрации радиосигналов на базе современных комплектующих и позволяет в требуемой полосе частот оцифровывать, демодулировать, обрабатывать и сохранять принятый сигнал. В этой системе была задействована специализированная, компьютерная плата Insys ADP64Z2APCI и субмодуль цифрового радиоприема ADMDDC416x100M с основными параметрами, приведенными в табл. 1.

Субмодуль DDC был подключен к выходам блока приема и регистрировал сигнал на первой промежуточной частоте 18.75 МГц, что позволило отказаться от части аналоговых блоков и второй промежуточной частоты. В то же время программное управление параметрами субмодуля позволило оперативно

Таблица 1

Параметры системы цифрового приема

Параметр	Значение
Число каналов АЦП	4
Число каналов DDC	4
Разрядность АЦП	16 бит
Тип микросхемы DDC	Texas Instruments GC5016
Частотный диапазон входных сигналов	2–140 МГц
Максимальная частота дискретизации АЦП	105 МГц
Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR), для *F*=21.4 МГц	85 дБ
Отношение сигнал/шум (SNR), для *F*=21.4 МГц	71 дБ
Входное сопротивление	50 Ом
Входной диапазон	±0.5 В

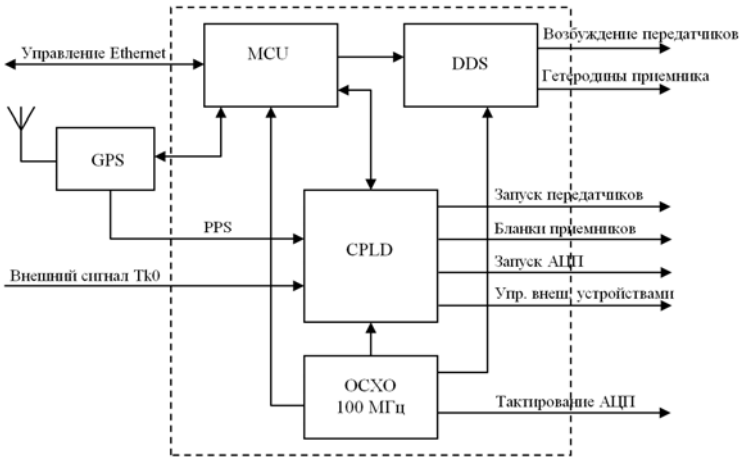

Рис. 1. Блок-схема новой системы синхронизации и формирования рабочих частот ИРНР

и гибко менять режимы работы ИРНР. В разных видах наблюдений КА применялись различные полосы приема (от 25 кГц до 1 МГц) и разные коэффициенты усиления.

Эта система с использованием субмодуля DDC была подключена параллельно штатной регистрирующей системе УПРК и использовалась в 2012–2014 гг. только в экспериментах по наблюдению КА.

В 2014 г. проводился очередной этап модернизации оборудования ИРНР. Была разработана и внедрена новая система синхронизации и формирования рабочих частот со следующими возможностями:

- формирование управляющих синхросигналов для всех блоков ИРНР (сигналы запуска/останова передатчиков, разрядников, приемников);
- привязка всех сигналов к единому опорному генератору;
- формирование рабочих частот для передающих устройств, гетеродинов приемных устройств и других систем ИРНР;
- управление системой фазирования передатчиков;
- взаимодействие с управляющей ЭВМ по интерфейсу Ethernet.

На рис. 1 показана блок-схема новой системы управления ИРНР. Ее ядром стал микроконтроллерный блок (MCU) на базе высокоскоростного ARM-процессора. В задачи блока входит конфигурация и управление микросхемами синтезаторов прямого синтеза (DDS), программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС, CPLD), связь с GPS-приемником, а также взаимодействие с управляющей ЭВМ. Сразу после включения питания этого блока происходит настройка всех подсистем на стандартные параметры работы. После этого устанавливается соединение с управляющей программой на ЭВМ и загружаются настройки, необходимые для конкретного эксперимента. В качестве канала управления и связи с ЭВМ используется Ethernet-контроллер и стандартный сетевой протокол UDP.

Источником единой опорной частоты для всех систем радара был выбран термостатированный кварцевый генератор 100 МГц (ОСХО M33005) с относительной нестабильностью $1.5 \cdot 10^{-9}$ с. Этот же генератор используется в качестве источника тактовой частоты для цифровых приемных устройств ИРНР.

Подсистема формирования рабочих частот реализована на базе двух синтезаторов AD9958 фирмы Analog Devices, эти DDS программируются блоком MCU и позволяют сформировать сложные модулированные (ФМ, ЛЧМ) сигналы излучения в рабочем диапазоне радара 154–162 МГц для самых разнообразных экспериментов. Эти же синтезаторы формируют гетеродинные частоты для блоков приемных устройств ИРНР.

Таблица 2

Этапы модернизации ИРНР

<table>
<tr><th>Дата</th><th>Тип излучаемых сигналов</th><th>Длительность РЛ-сигнала, мкс</th><th>Полоса приемника, кГц</th><th>Этапы модернизации оборудования ИРНР</th></tr>
<tr><td>2007, сентябрь</td><td>43-элементный фазоманипулированный сигнал</td><td rowspan="3">860</td><td rowspan="3">100</td><td rowspan="9">1) приемник аналоговый, две промежуточных частоты;
2) АЦП: тактовая частота 1 МГц, динамический диапазон 70 дБ;
3) синтезатор рабочих частот STEL1276, рабочий диапазон ~20 МГц;
4) блок умножителей частот x8;
5) привязка времени программная, точность ±0.5 с</td></tr>
<tr><td>2008, февраль</td><td rowspan="2">последовательность прямоугольного и 43-элементного фазоманипулированного сигналов</td></tr>
<tr><td>2008, сентябрь, 1–3</td></tr>
<tr><td>2008, сентябрь, 4–8</td><td rowspan="6">последовательность прямоугольного и 13-элементного фазоманипулированного сигналов</td><td rowspan="6">858</td><td rowspan="2">50</td></tr>
<tr><td>2009, февраль</td></tr>
<tr><td>2009, сентябрь</td><td rowspan="2">50
600</td></tr>
<tr><td>2010, апрель</td></tr>
<tr><td>2010, август–сентябрь</td><td>25</td></tr>
<tr><td>2011, апрель</td><td>25
500</td></tr>
<tr><td>2011, август</td><td>последовательность двух 13-элементных фазоманипулированных сигналов (на разных рабочих частотах), излучаемых в одном такте</td><td>442+442</td><td rowspan="4">1000</td><td>6) приемник: аналогово-цифровой, одна промежуточная частота;
7) АЦП+DDC: тактовая частота 100МГц, динамический диапазон 85 дБ;</td></tr>
<tr><td>2012, апрель
2012, август
2013, апрель
2013, июнь</td><td>последовательность двух плоских сигналов в одном такте излучения, в следующем такте излучается ЛЧМ-сигнал, скорость перестройки 498.891 МГц/с</td><td rowspan="2">442+442
902 (ЛЧМ)</td><td>8) привязка времени: GPS, точность 10^{-6} с</td></tr>
<tr><td>2014, апрель
2014, июль</td><td>последовательность двух плоских сигналов в одном такте излучения, в следующем такте излучается ЛЧМ-сигнал, скорость перестройки 407.452 МГц/с</td><td>9) синтезатор рабочих частот: AD9958, рабочий диапазон ~40 МГц;
10) блок умножителей частот: x4;</td></tr>
</table>

Основная логика формирования управляющих сигналов реализована в ПЛИС. Входными сигналами для нее служат тактовая частота 100 МГц от генератора ОСХО и внешний тактовый синхроимпульс Tk0 с частотой следования 24.4 Гц. Все остальные служебные сигналы для различных блоков ИРНР формируются из этих двух сигналов. Матрица ПЛИС имеет внутренние регистры управления, доступные MCU, что позволяет гибко формировать последовательности синхросигналов в зависимости от условий экспериментов, например, оперативно сдвигать положение сигнала «Запуск АЦП» на временной развертке циклов излучение–прием в каждом такте зондирования для получения информации из разных диапазонов высот. Система синхронизации обеспечивает жесткую привязку фазы всех сигналов к опорному генератору ОСХО.

Подсистема синхронизации с единой шкалой точного времени основана на высокостабильном GPS-приемнике Trimble Thunderbolt. Связь с ним также осуществляет блок MCU. По последовательному интерфейсу он получает текущие дату/время, а благодаря высокоточному секундному сигналу (PPS) привязывает все циклы излучения–приема с точностью до 10^{-6} с. Это позволяет существенно повысить синхронность выполнения всех режимов наблюдений в таком сложнейшем эксперименте, как «Радар—Прогресс».

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИРНР

При проведении КЭ «Радар—Прогресс» используется два основных режима работы ИРНР:

- режим ионосферных наблюдений;
- режим радиолокационных (РЛ) наблюдений за КА.

Режим ионосферных наблюдений служит для регистрации сигнала, рассеянного от ионосферной плазмы в диапазоне высот 150–1200 км. На излучение работают два фазированных передатчика с импульсной мощностью по 1.2 МВт каждый. УПРК формирует два зондирующих импульса с длительностями 700 и 200 мкс, один из которых заполнен 5-элементным кодом Баркера с пространственным разрешением 6 км. Цифровой приемник и система регистрации записывает отдельные временные развертки принятого сигнала в четырех независимых каналах: двух узкополосных и двух широкополосных с полосами 125 и 250 кГц соответственно. Принятые сигналы узкополосных каналов используются для получения температур ионов и электронов, скоростей дрейфов плазмы [Потехин и др., 2008; Shcherbakov et al., 2015], а сигналы с широкополосных каналов

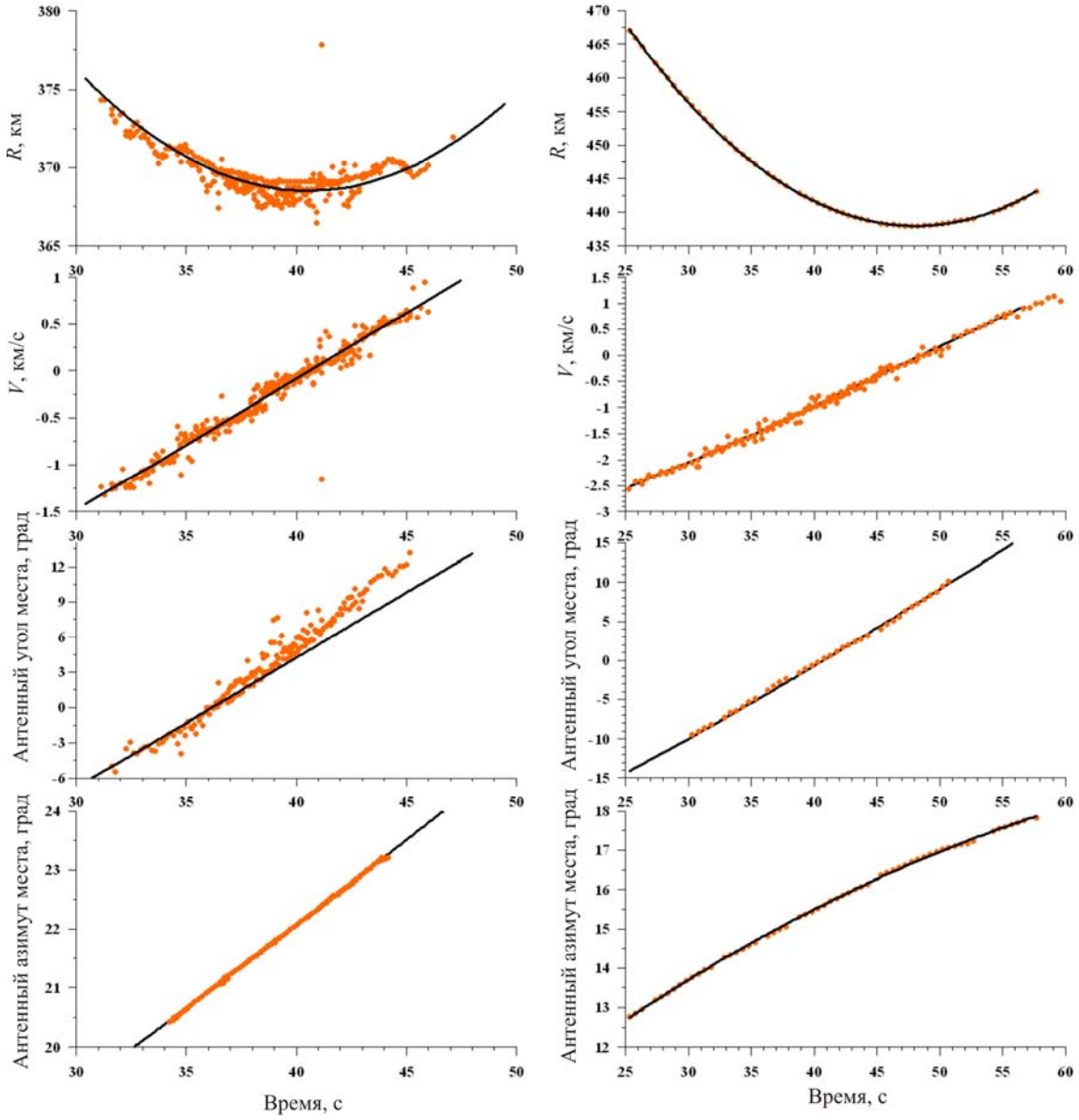

Рис. 2. Результаты измерений ТГК «Прогресс» (сверху вниз): дальность *R*, скорость *V*, антенный угол места, азимут 19 сентября 2007 г. (слева), 26 июля 2014 г. (справа). Оранжевый цвет — измеренные данные, черный цвет — расчетные данные

служат основой построения высотных профилей электронной концентрации ионосферной плазмы [Алсаткин и др., 2015].

Режим наблюдений за космическими аппаратами представляет собой сканирование определенного сектора в ДН ИРНР с целью обнаружения и сопровождения объекта. В этом же секторе происходит включение и отключение бортовых двигателей ТГК «Прогресс». УПРК включает этот режим к моменту времени входа ТГК в сектор сканирования ИРНР минус *DT* секунд и выключает во время выхода его из сектора сканирования плюс *DT* секунд; *DT* варьировал в пределах от 15 до 30 с. Область сканирования и количество рабочих частот *N* (азимутов ДН), участвующих в сканировании, определяются геометрией эксперимента, т. е. областью пересечения сектора сканирования и эфемериды ТГК. Все параметры (время, частоты, формы сигналов, длительность приемного окна, параметры АЦП и DDC) рассчитываются заранее и через конфигурационные файлы загружаются в управляющую программу УПРК.

На протяжении всех КЭ одновременно с модернизацией оборудования ИРНР пробовались зондирующие сигналы разных типов. В табл. 2 показаны этапы и типы сигналов, используемые в данный период времени.

Начиная с апреля 2012 г. оптимальным для наблюдения КА был принят чередующийся режим, состоящий из сигналов двух типов: два плоских (немодулированных) и один сигнал с ЛЧМ-заполнением с длительностями в 442+442 и 902 мкс соответственно.

Использование прямоугольных сигналов позволяет определять дальность, радиальную скорость и достаточно грубо — углы. Использование ЛЧМ-сигнала позволяет с высокой точностью определять антенный азимут, а также дальность и антенный угол места. Совместное использование сигналов двух типов дает наиболее полный и точный набор траекторной информации.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ

После модернизации УПРК ИРНР получил следующие возможности.

Использование программируемой логики позволяет гибко изменять логику работы систем радара без создания каких-либо новых или модификации существующих аппаратных блоков в соответствии с задачами экспериментов. Все изменения можно сделать в прошивке ПЛИС и затем загрузить ее в любое время.

Взаимодействие блока MCU с блоками DDS, GPS и ПЛИС с помощью последовательных интерфейсов позволяет в будущем использовать любые блоки других фирм-производителей без существенной переделки всего комплекса ПО ИРНР. Изменения затронут только микропрограмму для MCU.

Применение современных синтезаторов обеспечило возможность отказа от одной ступени умножения в подсистеме формирования сигналов возбуждения передатчиков и гетеродинов приемника. Если в предыдущем варианте такой системы умножение исходных сигналов DDS (~20 МГц) производилось в 8 раз, то в настоящем сигналы рабочего диапазона 154–162 МГц умножаются в 4 раза. Это существенно повысило качество формируемых радиосигналов.

Канал управления всей системой синхронизации, реализованный на стандартном оборудовании Ethernet, позволяет исключить привязку к каким-либо специализированным интерфейсам и ЭВМ. Возможно использование любых ЭВМ с любыми операционными системами для управления всем программно-аппаратным комплексом ИРНР.

Начиная с 2014 г. все КЭ на ИРНР выполняются с использованием новой системы синхронизации и управления и нового цифрового приемного устройства. На рис. 2 представлены отличия полученных траекторных параметров ТГК «Прогресс» в двух сессиях КЭ «Радар—Прогресс»: до модернизации УПРК (19 сентября 2007 г., левая панель) и после модернизации (26 июля 2014 г., правая панель).

После модернизации появилась возможность использования ЛЧМ-сигналов, посредством которых удалось существенно повысить точность измерений дальности и углов: при отношении сигнал/шум 10, точность по дальности составляет 100–300 м, по углам — 1–5 угл. мин. Для сравнения, точность измерений в экспериментах до 2010 г. при том же отношении сигнал/шум составляла 1.5 км по дальности, 30–60 угл. мин по углам. В настоящее время модернизированный УПРК определяет траекторные параметры в режиме реального времени, тогда как до модернизации процесс обработки занимал длительное время и проходил в несколько этапов. Достигнутая точность измерения траекторных параметров в режиме реального времени позволила решить задачу наведения телескопа, расположенного в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН, на низкоорбитальные КА по данным ИРНР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация управляющего и приемно-регистрирующего комплекса ИРНР в ходе выполнения и по результатам КЭ «Плазма—Прогресс» и «Радар—Прогресс» с 2007 по 2015 гг. позволила повысить точность определения траекторных параметров низкоорбитальных КА и расширила возможности УПРК для проведения будущих измерений. Использование современной элементной базы привело к унификации всех блоков УПРК и открыло перспективы дальнейшей модернизации ИРНР — уникальной научной установки национальной значимости № 01-28, входящей во всемирную сеть радаров подобного типа.

Другие результаты КЭ «Плазма—Прогресс» и «Радар—Прогресс», полученные на ИРНР, представлены в [Lebedev et al., 2011; Хахинов и др., 2012; Борисов и др., 2012; Khakhinov et al., 2012; Корсун и др., 2014].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алсаткин С.С., Медведев А.В., Ратовский К.Г. Особенности поведения ионосферы вблизи максимума ионизации по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния для низкой и умеренной солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 3, С. 28–36.

Борисов Б.С., Габдуллин Ф.Ф., Гаркуша В.И. и др. Радиофизические характеристики плазменного окружения низкоорбитальных КА по данным космических экспериментов // Нелинейный мир. 2012. Т. 10, № 10. С. 700–709.

Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1339–1345.

Корсун А.Г., Куршаков М.Ю., Кушнарев Д.С. и др. Исследование влияния двигателей космических аппаратов на ионосферу // Научное обозрение. 2014. Т. 8, № 2. С. 563–571.

Лебедев В.П., Хахинов В.В., Кушнарев Д.С., Твердохлебова Е.М. Повышение эффективности радиолокационных измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния // XXVIII Всероссийский симпозиум «Радиолокационное исследование природных сред»: Труды. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. Вып. 10, Т. 1. С. 324–331.

Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В. и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 356–362.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар—Прогресс» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 199–208.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Некоторые результаты активных космических экспериментов «Плазма—Прогресс» и «Радар—Прогресс» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2013. Специальный выпуск 5 (51). С. 160–163.

Khakhinov V.V., Shpynev B.G., Lebedev V.P., et al. Radiosounding of ionospheric disturbances generated by exhaust streams of the transport spacecraft “Progress” engines // Proc. PIERS. Moscow, Russia. 2012. P. 1168–1171.

Lebedev V.P., Khakhinov V.V., Gabdullin F.F., et al. Studying the characteristics of the plasma environment at low-orbiting space vehicles by radar methods // Cosmonautics and Rocket Engineering. 2008. V. 50 (1). P. 51–60.

Lebedev V., Khakhinov V., Potekhin A., et al. Variations of the transport spacecraft “Progress” radar characteristics connected with the orbital maneuvering subsystem run // Proc. XXX URSI General Assembly, HP2.16. Istanbul, Turkey, 2011.

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., et al. Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar // Proc. PIERS-2009

"Progress in Electromagnetics Research Symposium". Moscow, Russia, August 18–21, 2009. Moscow, Russia, 2009. P. 217–221.

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., et al. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk Incoherent Scatter Radar // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2015. V. 120, N 12. P. 10851–10863. DOI: 10.1002/2015JA021678.

URL: http://www.energia.ru/rus/iss//researches/geophis-13.html (дата обращения 18 мая 2017 г.).

URL: http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment_q.aspx?idE=183 (дата обращения 18 мая 2017 г.).

REFERENCES

Alsatkin S.S., Medvedev A.V., Ratovsky K.G. Some peculiarities in the ionosphere dynamics near the ionization maximum from Irkutsk Incoherent Scatter Radar data for low and moderate solar activities. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2015, vol. 1, no. 3, pp. 28–36. (In Russian). DOI: 10.12737/11450.

Borisov B.S., Gabdullin F.F., Garkusha V.I., Korsun A.G., Kurshakov M.Yu., Strashinskiy V.A., Tverdokhlebova E.M., Khakhinov V.V. Radiophysical characteristics of low-orbit spacecraft plasma environment revealed by space experiments. *Nelineinyi mir* [Nonlinear World]. 2012, vol. 10, no. 10. pp. 700–709. (In Russian).

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Alsatkin S.S., Ratovsky K.G., Kushnarev D.S., Tverdokhlebova E.M., Kurshakov M.Yu., Manzheley A.I., Timofeeva N.I. Results of remote sounding of ionospheric disturbances in active space experiments "Radar—Progress". *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of the Earth remote sounding from the space]. 2012, vol. 9, no. 3, pp. 199–208. (In Russian).

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S. Some results of the active space experiments "Plasma—Progress" and "Radar—Progress". *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University]. 2013, Special Iss. 5 (51), pp. 160–163. (In Russian).

Khakhinov V.V., Shpynev B.G., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S., Khabituev D.S. Radiosounding of ionospheric disturbances generated by exhaust streams of the transport spacecraft "Progress" engines. *Proc. PIERS, Moscow, Russia*. 2012. P. 1168–1171.

Korsun A.G., Kurshakov M.Yu., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Tverdokhlebova E.M., Khakhinov V.V., Ratovsky K.G. Investigation into effect of spacecraft engines on the ionosphere. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review]. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 563–571. (In Russian).

Lebedev V.P., Khakhinov V.V., Gabdullin F.F., Korsun A.G., Tverdokhlebova E.M., Laletina E.A., Manzhaley A.I. Studying the characteristics of the plasma environment at low-orbiting space vehicles by radar methods. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2008, vol. 50 (1). pp. 51–60.

Lebedev V.P., Khakhinov V.V., Kushnarev D.S., Tverdokhlebova E.M. Improving the efficiency of radar measurements made with Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *XXVIII Vserossiiskogo simposiuma "Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnykh sred": Trudy* [Proc. XXVIII National Symposium "Radar Study of Natural Environments"]. St. Petersburg, Russia. 2013, vol. 1, no. 10, pp. 324–331. (In Russian).

Lebedev V., Khakhinov V., Potekhin A., Kushnarev D., Zarudnev V. Variations of the Transport Spacecraft "Progress" Radar Characteristics Connected with the Orbital Maneuvering Subsystem Run. *Proc. XXX URSI General Assembly, HP2.16. Istanbul, Turkey*. 2011.

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Shpynev B.G. Active space experiments with the use of the transport spacecraft "Progress" and Irkutsk IS Radar. Proc. *PIERS. Moscow, Russia*. August 18–21, 2009. Moscow, Russia. 2009. P. 217–221.

Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Shpynev B.G. Development of diagnostic capabilities of the Irkutsk incoherent scattering radar. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2008, vol. 46, no. 4, pp. 356–362. DOI: 10.1134/S0010952508040102.

Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S. Calculation of meridional neutral winds in the middle latitudes from the Irkutsk incoherent scatter radar. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2015, vol. 120, no. 12, pp. 10851–10863. DOI: 10.1002/2015JA021678.

Zherebtsov G.A., Zavorin A.V., Medvedev A.V., Nosov V.E., Potekhin A.P., Shpynev B.G. Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Radiotekhnika i electronica* [J. Communication Technology and Electronics]. 2002, vol. 47, no. 11, pp. 1339–1345. (In Russian).

URL: http://www.energia.ru/rus/iss//researches/geophis-13.html (accessed May 18, 2017).

URL: http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment_q.aspx?idE=183 (accessed May 18, 2017).

Как цитировать эту статью

Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Хахинов В.В., Евстифеев С.Е., Заруднев В.Е. Модернизация Иркутского радара некогерентного рассеяния. Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 88–94.

How to cite this article

Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Khakhinov V.V., Evstifeev S.E., Zarudnev V.E. Modernization of the Irkutsk Incoherent Scatter Radar. Solar-Terrestrial Physics. 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 88–94.