

Приемник ионозонда "Парус-А": принцип работы и возможные пути модернизации

С.В. Литвинов¹, И.А. Глинкин², Ю.М. Власов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет»,
E-mail: Litvinov_S@mirea.ru

²ОАО «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», E-mail: IGlinkin@niidar.ru

В статье приводится описание, структурная схема и принципа работы отечественного сетевого ионозонда «Парус-А», взятого за основу при воссоздании ионосферной сети Росгидромета. Рассматривается структурная схема и принцип работы приемной части. Наряду с сохранением общей идеологии и показавшей себя надежности аппаратуры, выдвигаются предложения по модернизации: увеличение частотных приемных каналов без увеличения физических приемных каналов устройства, переход на отечественную электронную компонентную базу.

Receiver of the ionosonde "Parus-A": the principle of operation and the possibility of modernization

S.V.Litvinov¹, I.A.Glinkin², Yu.M.Vlasov²

¹Federal State Budget Education Institution of Higher Education «MIREA - Russian Technological University», E-mail: Litvinov_S@mirea.ru

²Join Stock Company «Distant Radiocommunication Scientific Research Institute»,
E-mail: IGlinkin@niidar.ru

The article provides a description, block diagram and principle of operation of the domestic network ionosonde "Parus-A", taken as the basis for the reconstruction of the ionospheric network of Roshydromet. The block diagram and the principle of operation of the receiving part are considered. Along with the preservation of the general ideology and the proven reliability of the equipment, proposals are put forward for modernization: an increase in the frequency receiving channels without increasing the physical receiving channels of the device, the transition to a domestic electronic component base.

Введение

Выполнение задач радиотехнических систем (РТС) различного назначения (радиолокация, радиосвязь и пр.) использующих диапазон коротких волн возможно только при своевременном обновлении информации о текущих параметрах среды распространения (ионосферы). Наиболее эффективным видится создание разветвленной сети мониторинга состояния ионосферы современными техническими средствами с возможностью оперативного доступа к результатам зондирования с целью подстройки параметров РТС под условия распространения радиоволн.

В последнее десятилетие отмечается рост распространения использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС как

информационных ресурсов для мониторинга состояния ионосферы. [1] Характеристики принятых сигналов ГНСС позволяют оценить электронную структуру ионосферы.

При этом, из многообразия существующих радиофизических методов и технических средств диагностики ионосферы основным инструментом является радиолокационная станция (РЛС) наземного базирования, проводящая зондирование ионосферы, получившая название «ионозонд». Ионозонд состоит из следующих основных частей: приемных и передающих антенн, передатчика сигнала зондирования, приемника сигнала, отраженного от ионосферы и обрабатывающего программно-аппаратного модуля, определяющего основные характеристики ионосферы. С момента появления в середине прошлого века первых РТС и до настоящего времени ионозонд прошел тот же эволюционный путь развития, что и основные виды РТС КВ-диапазона - системы радиосвязи, радиолокации и радиопеленгации. Совершенствование ионозонда сопровождалось стремительным развитием как технологической базы и электронно-вычислительных машин, так и научно-технических и методических изысканий в области радиотехники, к основным из которых относятся применение сложных сигналов и согласованные методы их обработки.

В настоящее время наибольшее распространение в мире получили ионозонды DPS-4 (США) и CADI (Канада). DPS-4 (Digisonde Portable Sounder), разработан в Массачусетском университете (США) в 90-х годах прошлого века широко используется во всем мире и является базовым мировым инструментом исследования ионосферы. [2] Ионозонд CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde), разработанный в Канаде (Western Ontario University, London, Канада) и изготовленный компанией Scientific Instrumentation Ltd. (SIL, Канада) получил применение в качестве сетевого ионозонда для осуществления мониторинга состояния высокоширотной ионосферы, который осуществляет Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. [3] Также АНИИ оснастили шесть северных геофизических станций Аппаратурой зондирования ионосферы (АЗИ с ЛЧМ).

Как показал сравнительный анализ существующих комплексов зондирования ионосферы аппаратура вертикального зондирования постоянно совершенствуется. Не смотря на успешную практику применения маломощных ионозондов со сложными сигналами, мощные станции работают заметно стабильнее во время ионосферных бурь и большого поглощения в спорадическом слое Es. Таким образом, имеет смысл применять ионосферные станции с возможностью работы со сложными сигналами и на высокой мощности.

Ионозонд «Парус-А»

С 2010 года активно разворачивается ионосферная сеть Росгидромета (ФГБУ «ИПП им. ак. Е.К.Федорова»), оснащаемая отечественными ионозондами «Парус-А» (ИЗМИРАН, ООО НТЦ «Радикон-М»). [4] Ионозонды «Парус-А» утвержденного типа выпускались в течение 5 лет, в соответствии со свидетельством на утвержденный тип, выданный Росстандартом (номер в Госреестре СИ 51425-12). [5] Ионозонд показал высокие результаты работы в части качества получаемой информации, функциональных возможностей, интуитивно понятном использовании, возможностей модификации, бесперебойности работы и ремонтпригодности. Общий вид ионозонда «Парус-А» представлен на рисунке 1.

Ионозонд «Парус-А» предназначен для диагностики состояния ионосферы в автоматическом и ручном режимах методом вертикального зондирования в соответствии с требованиями WMO (World Meteorological Organization), URSI (International Union of Radio Science) и Росгидромета. Он построен по классической схеме импульсного локатора, использующего простой радиоимпульс переменной

частоты в диапазоне 1...20 МГц. Используя входящую в состав ионозонда систему синхронизации на основе GPS (ГЛОНАСС) (Global Positioning System; Глобальная навигационная спутниковая система), возможны дополнительные режимы работы, в частности, реализация методов прямого трансионосферного (ТИЗ) и обратного трансионосферного (ОТИЗ) зондирования. Также ионозонд хорошо себя показал как инструмент для экспериментальных работ по наклонному зондированию ионосферы и опытах по дистанционной поверке самих ионозондов. [6]

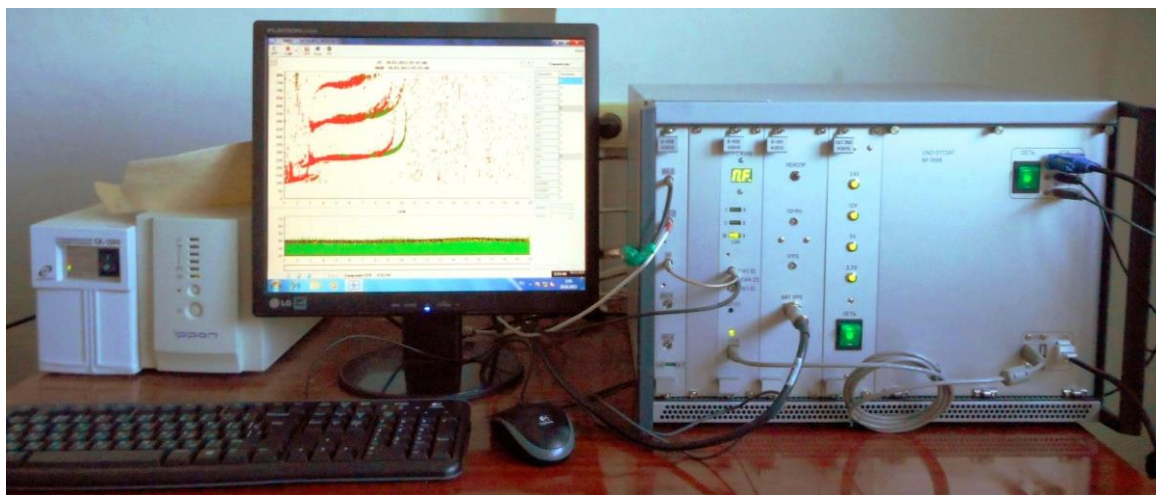


Рис. 1. Общий вид ионозонда «Парус-А»

Конструкция ионозонда выполняется по модульному принципу, а режим работы изменяется согласно программе, что позволяет его легко адаптировать к конкретным потребностям различных экспериментальных комплексов диагностики ионосферы. Общая структурная схема ионозонда приведена на рисунке 2.

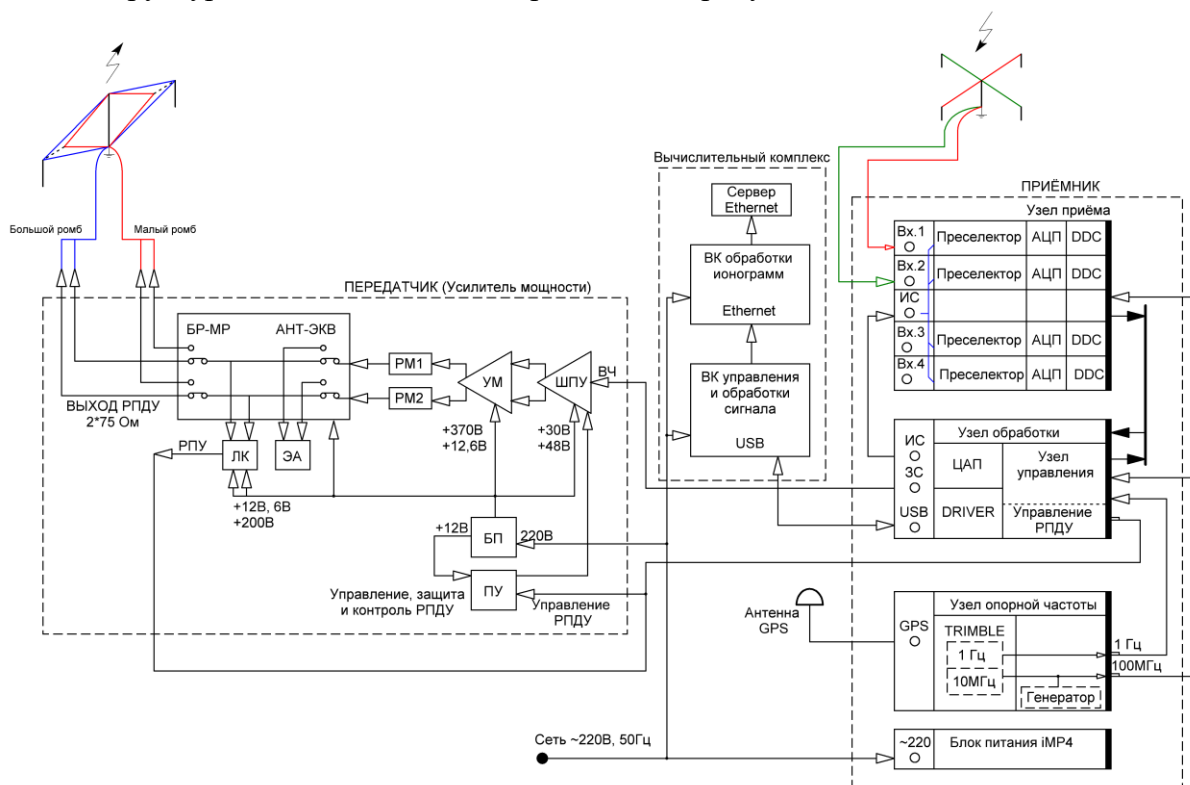


Рис. 2. Структурная схема ионозонда «Парус-А»

Особенностью схемы построения ионозонда является наличие достаточно мощного радиопередающего устройства (РПДУ), которое совместно с антенной системой, в данном случае разделенной на приемную и передающую части, обеспечивает высокое соотношение сигнал/шум на входе приемного устройства. Для «Паруса-А» максимальная импульсная мощность излучения при амплитудно-модулированном сигнале имеет величину ~ 12 кВт, хотя в обычной практике регулярных наблюдений коэффициент использования мощности составляет $\sim 75\%$. Ионозонд имеет возможность работать как на совмещенную (приемопередающую), так и на отдельные антенны. Основной конфигурацией антенной системы являются линейная передающая, типа комбинированного ромба (большой и малый ромбы для работы в нижней и верхней части диапазона зондирования), и скрещенные приемные, типа «дельта», что позволяет осуществлять поляризационное разделение магнитоионных компонент волнового поля. Именно эти параметры (высокая излучающая мощность и заметные боковые лепестки диаграммы направленности) позволяют текущей конфигурации ионозонда осуществлять наклонное зондирование

Цифровое радиоприемное устройство (РПУ) в данном варианте служит для приема двух поляризационных компонент сигналов, прошедших сквозь плазму ионосферы, и имеет два основных и два резервных канала. РПУ имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих частот – $1 \div 20$ МГц;
- уровень собственных шумов приемника – -190 дБВт/Гц;
- динамический диапазон – более 110 дБВт;
- погрешность измерения амплитуд отраженных сигналов – 1 дБ;
- погрешность привязки времени к шкале времени GPS – менее 1 мкс.

В ходе зондирования процессор персональной электронно-вычислительной машины (ЭВМ) контролирует все процессы в системе. Запуск цикла зондирования возможен как по команде оператора, так и по сигналу таймера ПЭВМ. Синхронизация работы приемника, передатчика и регистратора осуществляется модулем синхронизации и управления. Длительность излученного импульса, частота посылки импульсов, длина реализации задаются программно. Для работы в комплексе с другими ионозондами используются внешний опорный высокостабильный сигнал f_0 . Для приема поляризованного сигнала используются скрещенные антенны. Разделение компонент производится программно после приема двух последовательных реализаций отраженного сигнала с антенн Север-Юг и Восток-Запад. Синтезатор приемника формирует радиоимпульс достаточной для возбуждения передатчика мощности. Это обеспечивается использованием антенного коммутатора «Парус-А». Питание приемника и передатчика осуществляется от отдельных источников, контролируемых ПЭВМ. Включение источников производится заблаговременно. После окончания цикла зондирования источник выключается. Контроль состояния источников – внутренний, в ПЭВМ выдается совокупный сигнал готовности источников. Конструктивно модули управления и АЦП выполнены в виде двух плат в стандарте IBM PC AT.

Непрерывная работа первых экземпляров на протяжении более 12 лет доказывает высокий уровень разработки, надежность и качество изготовления. Однако, за прошедшие с начала разработки 15 лет многое изменилось и в техническом плане, и в методологии подходов к проектированию радиотехнических средств, и в геополитической обстановке, влияющей на применяемую электронную компонентную базу. Таким образом актуальным видится разработка и изготовление отечественных ионозондов нового поколения, на смену уже устаревающим действующим образцам. Новые ионозонды, очевидно, должны перенять лучшие достижения действующей аппаратуры, при этом, целесообразно ввести дополнительные функциональные возможности.

Приемное устройство ионозонда «Парус-А»

Разберем структурную схему построения одного канала приемника «Парус-А», представленную на рисунке 3.

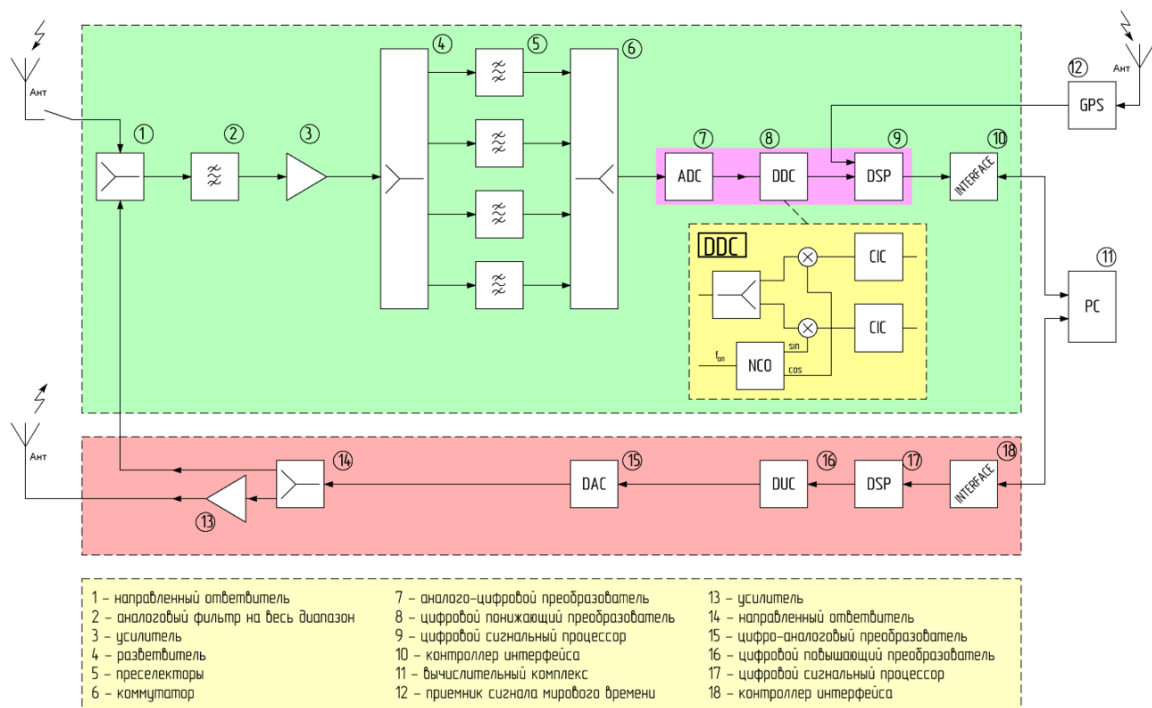


Рис. 3. Структурная схема одноканального приемника ионозонда «Парус-А»

Алгоритм его работы является классическим. На вход приемного канала поступает сигнал с антенны, структура которой не рассматривается в данной работе. Сигнал поступает на направленный ответвитель (1), который служит для подачи через него сигнала калибровки совместно либо отдельно от сигнала с антенны. Затем сигнал проходит фильтрацию в аналоговом фильтре (2) на весь рабочий частотный диапазон, после чего в усилителе (3) уровень сигнала поднимается до необходимого уровня. В некоторых случаях после усилителя стоит альтернативный аттенюатор, который снижает уровень сигнала, в случае превышения порога в целях предотвращения перегрузки АЦП, однако практика показала, что его необходимость переоценена. Далее через разветвитель (4) сигнал подается на преселекторы (5), настроенные на соответствующие поддиапазоны, охватывающие с перекрытием весь рабочий диапазон. Количество поддиапазонов изменяется в каждой конкретной реализации в зависимости от необходимой частотной избирательности преселекторов. Затем через коммутатор (6) сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (7), а затем в цифровой понижающий преобразователь (8), в котором происходит цифровой перенос на нулевую частоту и дополнительная фильтрация. Дальнейшая обработка и преобразования проводятся в цифровом сигнальном процессоре (9), на который также поступает сигнал синхронизации с системой единого времени с приемника GPS (12). Система единого времени (СЕВ) может быть представлена различными приемниками GPS, ГЛОНАСС и др. На вычислительный комплекс (11) информация поступает через контроллер интерфейса (10) типа USB, Ethernet и т.д. Тип контроллера выбирается в зависимости от требований, а вычислительный комплекс в простейших случаях представляет из себя ПЭВМ.

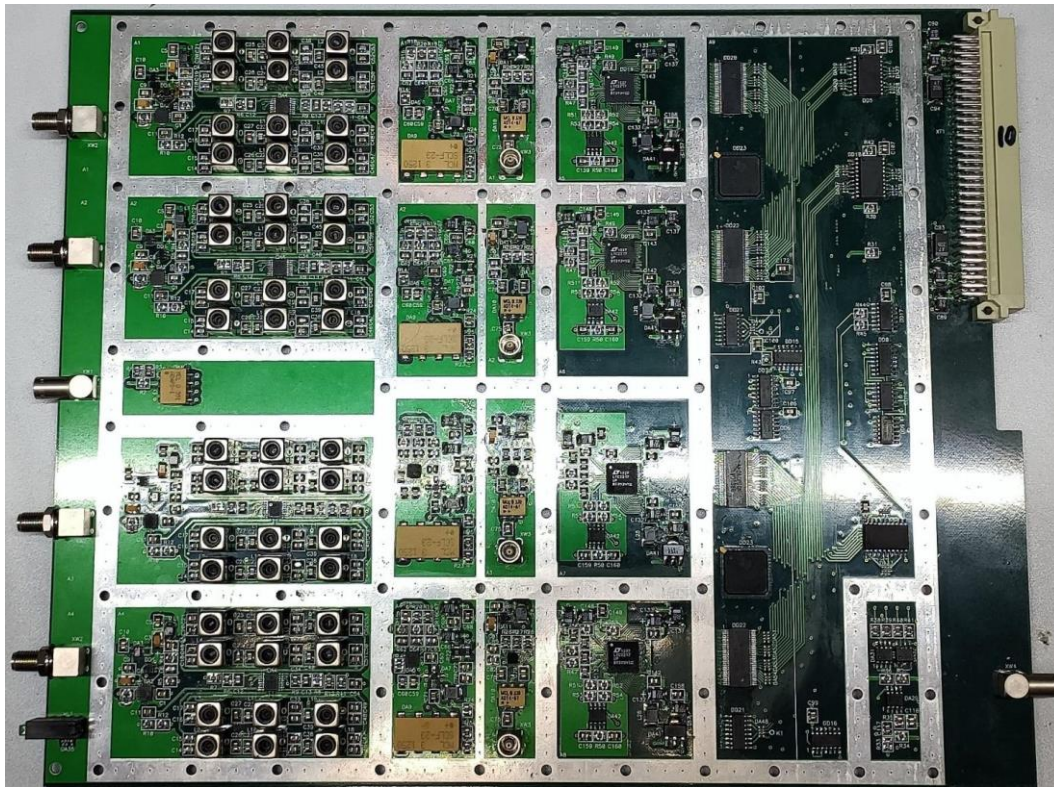


Рис. 4. Модуль четырехканального приемника ионозонда «Парус-А»

В свою очередь устройство формирует сигнал калибровки, который также может служить сигналом зондирования. Через аналогичный контроллер интерфейса (18) с вычислительного комплекса поступает управляющая информация на сигнальный процессор (17), который формирует сигнал в цифровом виде. Этот сигнал затем переносится на рабочую частоту в цифровом повышающем преобразователе (16) и поступает на вход цифро-аналогового преобразователя (15). Аналоговый сигнал через направленный усилитель (14) подается на вход приемного канала для его калибровки, а также подается на усилитель (13) и дальше на передающую антенну. Кроме того этот сигнал используется на этапе отладки или ремонта в качестве эталонного.

Такая классическая схема приемного устройства имеет ряд преимуществ по сравнению с супергетеродинными приемниками, однако она может быть модернизирована и применена как в ионозондах, так и в ряде других устройств коротковолнового диапазона. В частности, такой приемник может быть адаптирован для многочастотной работы.

Модернизация приемного устройства, увеличение частотных каналов

Отличие многочастотного приемника (рисунок 5) от одночастотного заключается в наличии нескольких частотных каналов, состоящих из цифровых понижающих преобразователей (DDC) и сигнальных процессоров (DSP). Т.е. сигнал после АЦП через коммутатор поступает сразу на все DDC и DSP (в количестве от 2 шт.). [7] В каждом DDC происходит настройка на свою частоту посредством цифрового гетеродина, что позволяет этим каналам работать автономно, в любом режиме и независимо друг от друга.

Для удобства будем считать количество частотных каналов в приемнике ионозонда нового типа равным десяти. В реальности их количество может изменяться в зависимости от конкретных требований и задач. Полученная система многочастотного приемника, подключенного к одной антенне раскрывает множество новых

возможностей. Например, в ионозонде «Парус-А» перед началом каждого сеанса вертикального зондирования проводится процедура поиска рабочих каналов (ПРК), которая предназначена для исключения из работы списка запрещенных частот, а также частот, занятых другими источниками. В таком режиме многочастотная схема может на порядок сократить время поиска рабочих каналов. Также, при условии наличия соответствующего передатчика, время вертикального зондирования может быть сокращено в десять раз, при разделении частотного диапазона между частотными каналами и, соответственно, одновременной их работе.

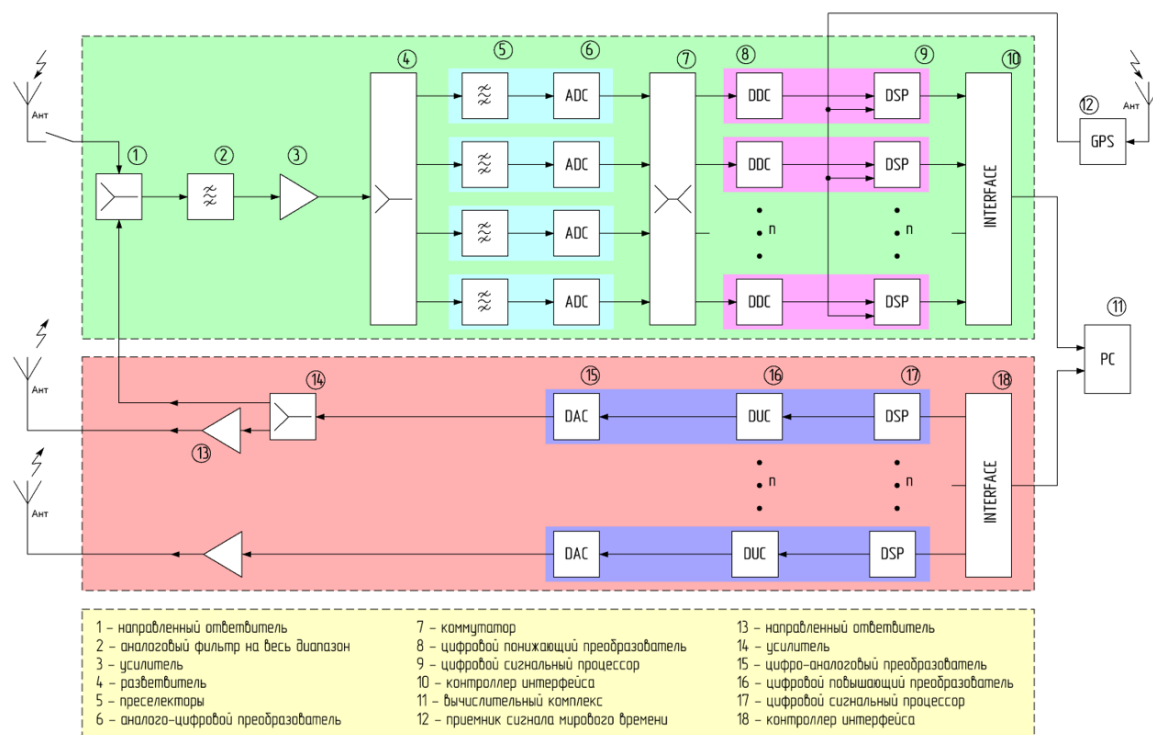


Рис. 5. Структурная схема одноканального многочастотного приемника

Модернизация приемного устройства, использование отечественной электронной компонентной базы

Неоднократно принимались попытки полностью отказаться от использования иностранных комплектующих при разработке электронной аппаратуры, притом не только в системах оборонного характера, но и в аппаратуре гражданского назначения. В последние несколько лет отмечено повышение применения отечественной элементной базы, в особенности пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов и т.д.), однако и отечественные микросхемы непрерывно совершенствуются и способны конкурировать с ведущими иностранными производителями. [8]

В работе авторов схожая ситуация с применением отечественной и иностранной элементной баз. За время многолетнего проектирования и разработок приемных устройств для различных радиолокационных устройств, выведена уникальная универсальная формула приемника, который адаптируется под конкретные технические требования. В частности, получен патент на полезную модель № 156737 «Многоканальный многочастотный цифровой радиолокационный приемник». [7] С развитием отечественной электронной промышленности появилась возможность реализовать эти проверенные временем решения полностью на отечественной элементной базе. Так, авторами разрабатывался проект цифрового приемного

устройства (ЦПУ), работа и взаимодействие блоков которого поясняется по структурной схеме, приведенной на рисунке 6.

Приемный канал построен по схеме с преобразованием в цифровой код на несущей частоте. На вход цифрового приемника поступает входной сигнал F_c от АФУ, сигнал опорной частоты $F_t = 80$ МГц (выбирается на этапе разработки). В цифровом приемнике одновременно в рабочем диапазоне частот осуществляется фильтрация, усиление, аналого-цифровое преобразование, децимация и предварительная цифровая фильтрация на рабочей частоте настройки. Аналоговый тракт включает в себя антенный ввод и фильтры на входе АЦП.

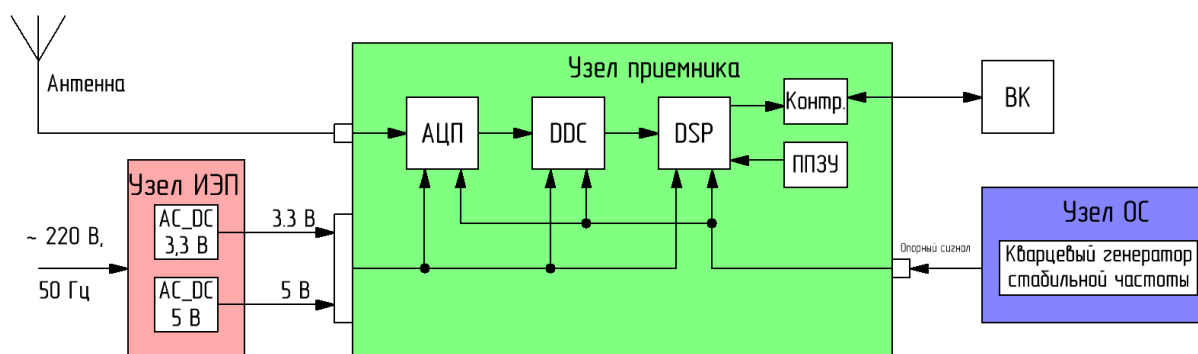


Рис. 6. Структурная схема ЦПУ

Цифровой тракт состоит из 16-ти разрядного АЦП 5101НВ045 фирмы «Миландр», ПЛИС (аналог Cyclone III (ф. Altera) ПЛИС 5578ТС064 фирмы АО "ВЗПП-С"), реализующей функции DDC, обеспечивающего настройку на заданную рабочую частоту и предварительную фильтрацию, и сигнального процессора 1967ВН028 фирмы «Миландр» или 1967ВН044 фирмы «Миландр» (DSP). Быстродействующие сигнальные процессоры, на которых реализуются алгоритмы полосовой фильтрации, амплитудно-фазовой коррекции и др., стоят в каждом канале приёмного устройства. ППЗУ 1636РР1У фирмы «Миландр». Все пассивные компоненты и разъёмы, а также обвязка основных микросхем отечественных производителей.

Съём информации и управление параметрами цифрового тракта осуществляется через шину (возможны различные варианты, например, по протоколу «Ethernet» или «USB 2.0»).

В качестве основного опорного генератора используется мал шумящий прецизионный кварцевый генератор ГК200-ТС, частота которого равна 10 МГц. Из частоты 10 МГц на основе системы фазовой автоподстройки частоты с делителем частоты в цепи обратной связи формируется опорная частота $F_t = 80$ МГц, используемая в приемном тракте для запуска АЦП, DDC тактирования DSP.

Первичное электропитание аппаратуры осуществляется однофазным переменным напряжением (220 ± 22) В с частотой $(50 \pm 2,5)$ Гц. Требования к первичной сети определяются техническими характеристиками вторичных источников питания, требованиями по безопасной эксплуатации оборудования, стандартами электробезопасности, суммарным потреблением ЦПУ.

Процесс перехода от иностранной элементной базы к отечественной не может быть резким и одномоментным. Работы по освоению компонентов российского производства ведутся в течение нескольких лет. Проведенные работы свидетельствуют о том, что отечественная электронная промышленность стремительными темпами развивается и совершенствуется, применение отечественной ЭКБ становится все проще и удобнее и

полный отказ от иностранных компонентов в некоторых областях возможен в ближайшие годы.

Заключение

Опыт эксплуатации десяти экземпляров ионозонда «Парус-А» показал исключительную устойчивость воспроизводимой им структуры ионосферы в условиях самых разнообразных возмущений — ионосферных бурь, F-рассеяний, наклонных отражений, волн широкого спектра и т.д. В этом качестве он не только не уступает, но даже превосходит западные образцы. Что же касается точности оцениваемых характеристик, оперативности обработки и доведения конечной информации до потребителя, он сравним с ними.

Схема многочастотного приемника может быть применена в отечественных ионозондах типа «Парус-А». В таком случае ионозонд сможет одновременно работать в ионосферной сети осуществляя наклонное зондирование. А в случае, если позволяет передатчик время вертикального зондирования может быть сокращено пропорционально количеству частотных каналов.

Стремительное развитие микроэлектронной цифровой и аналого-цифровой элементной базы и появление новых компонентов позволяет выполнить высококачественный приёмник на основе цифровых принципов обработки радиосигнала с использованием отечественной элементной базы, что обеспечивает информационную безопасность ЦПУ.

Литература

1. Скрипачев В. О. Программный комплекс для обработки данных ионосферных измерений // Программные продукты и системы. — 2013. — Т. 104, № 4. — С. 213–216.
2. Reinisch, B. W., H. Kohl, R. Ruster and K. Schlegel. Modern Ionosondes in Modern Ionospheric Science/ European Geophysical Society, 37191 Katlenburg-Lindau, Germany, pp. 440-458, 1996.
3. Gao S., Mac.Dougall J.W. A dynamic ionosonde design using pulse coding/ Canadian Journal of Physics (ISSN 0008-4204), vol. 69, Aug.-Sept. 1991, p. 1184-1189.
4. Развитие исследования ионосферы земли методом комплексного зондирования / С. В. Литвинов, Д. С. Мудрик // XVII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция "Радиолокация и связь - перспективные технологии", Москва, 05 декабря 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Мир науки", 2019. – С. 34-39.
5. Проведение испытаний в целях утверждения типа ионозондов "Парус-А" / В. Т. Минлигареев, Е. А. Паньшин, С. Н. Чурилов // Гелиогеофизические исследования. – 2012. – № 2. – С. 40-46.. URL: <http://vestnik.geospace.ru>.
6. Результаты эксперимента по комплексному зондированию ионосферы на ионозондах серии "Парус-А" ионосферной сети Росгидромета / Н. Г. Котонаева, В. И. Денисова, Е. А. Паньшин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИВлГУ. 2019. С 326 - 335.
7. Арансон Б.А., Власов Ю.М., Глинкин И.А., Панкин В.В. и др. Патент на полезную модель № 156737 «Многоканальный многочастотный цифровой радиолокационный приемник»
8. Глинкин И. А., Литвинов С. В., Мудрик Д. С. Цифровое приемное устройство коротковолнового диапазона на отечественной элементной базе // Союз

машиностроителей России. Национальная научно-техническая конференция. 2020. №IX. С. 27-30

9. Контрреинжиниринг радиоэлектронных средств / М. С. Костин, Д. С. Воруничев, Д. А. Корж // Российский технологический журнал. – 2019. – Т. 7. – № 1(27). – С. 57-79. – DOI 10.32362/2500-316X-2019-7-1-57-79.

10. S Litvinov 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1632 012021 DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1632/1/012021>

11. Большаков В. О., Скрипачев В. О. Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли над стендом Сура по сигналам навигационных КА // Космонавтика и ракетостроение. — 2010.