

### **Программно-определяемая радиосистема в тракте приёма данных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли**

Ю.Д. Овчинников, Е.А. Коровин, Г.Г. Щукин, И.А. Готюр, С.В. Чернышев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13. [yurii\\_ovchinniko@mail.ru](mailto:yurii_ovchinniko@mail.ru)

*Работа посвящена созданию универсального программно-аппаратного комплекса приёма информации от космических аппаратов ДЗЗ. Основным принципиальным отличием проектируемого комплекса от существующих является его построение с применением технологии SDR — Software Defined Radio (программно-определяемого радио), обуславливающее возможность применения комплекса для работы в составе различных существующих и перспективных космических систем в качестве оконечной аппаратуры тракта передачи данных по радиоканалу. Созданный макет радиотехнического комплекса позволяет решать широкий спектр задач приёма, декодирования и анализа сигналов космических аппаратов, с его помощью возможен приём и обобщение данных, получаемых от различных отечественных и зарубежных космических систем.*

*The paper is devoted to the creation of a universal software and hardware system for receiving information from spacecrafts of remote sensing. The main fundamental difference between the projected complex and the existing ones is its construction using the SDR - Software Defined Radio technology (software-defined radio), which makes it possible to use the radio engineering complex to operate as a part of various existing and prospective space systems as the terminal equipment for the data transmission over the radio channel. The created model of the radio-technical complex allows to solve a wide range of problems of reception, decoding and analysis of signals of space vehicles, with its help reception and generalization of data received from various domestic and foreign space systems is possible.*

На современном этапе развития деятельность Вооруженных Сил как в мирное, так и в военное время сопряжена с эксплуатацией и применением большого количества высокотехнологичной военной техники и вооружения. Возможность и эффективность выполнения боевых и специальных задач подразделениями, имеющими на вооружении сложные технические системы и комплексы технических средств, непосредственно зависит от правильности учета метеорологической обстановки в районе их применения. В этих условиях важное значение приобретает информация, получаемая с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и оперативность её получения потребителями.

В настоящее время в России, США, странах Западной Европы, Японии, Китае, Индии и ряде других стран ведутся работы по совершенствованию спутниковых метеорологических систем, основными направлениями которых являются повышение характеристик бортовой аппаратуры, увеличение числа используемых инструментов наблюдения и измерения характеристик геосфер [1].

С ростом количества научной аппаратуры на борту космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) и увеличением суммарного потока передаваемой ими информации, возрастают требования к пропускной способности каналов передачи данных с борта КА на наземную станцию приёма и обработки спутниковой информации. С целью обеспечения необходимых параметров космических радиолиний, в тракте передачи данных космического аппарата применяются эффективные способы кодирования и модуляции радиочастотных сигналов, повышающие помехоустойчивость и максимально приближающие

пропускную способность космической радиолинии к теоретически достижимому предельному значению.

В связи с непрерывным ростом объемов данных, генерируемых космическими системами ДЗЗ, связанным как с увеличением численности группировок летательных аппаратов, так и повышением скорости исходящего потока данных от каждого аппарата, к современным комплексам приёма спутниковой информации предъявляется требование обеспечения принципиальной возможности адаптации к осуществлению информационного обмена в составе перспективных космических систем без внесения каких-либо изменений в электронную радиотехническую часть комплекса, с сохранением взаимодействия с действующими группировками летательных аппаратов, в тракте передачи данных которых используются менее энергоэффективные способы кодирования и модуляции высокочастотных информационных сигналов.

Ключевой элемент комплекса приёма спутниковой геофизической информации, определяющий его основные тактико-технические характеристики и потенциал в части решения задач целевого предназначения — приёмное устройство космической радиолинии. Диапазон решаемых комплексом задач определяется и непосредственно зависит от характеристик входящего в состав комплекса приёмного устройства, технической возможности его применения для осуществления информационного взаимодействия и приема информации посредством космических радиолиний с существенно различающимися параметрами от многих космических систем.

Ключевое преимущество программно-определяемых радиосистем (Software Defined Radio - SDR) перед другими типами систем аналогичного назначения состоит в возможности варьирования их параметров в широком диапазоне значений и оперативной реконфигурации реализуемых системой целевых функций в соответствии с решаемыми прикладными задачами. Данное преимущество SDR систем позволяет реализовать на их основе гибкие и универсальные тракты приёма данных от космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, способные работать с произвольными типами информационных сигналов, ширина спектра которых в частотной области не превышает ширину полосы пропускания тракта цифрового радиоприёмного устройства.

Принимая во внимание вышесказанное, ясна необходимость перехода от существующих на данный момент принципов и технологий построения радиоприёмной аппаратуры наземных пунктов сбора и обработки информации, ввиду невозможности обеспечения ими решения задачи комплексного приёма информации от современных космических аппаратов ДЗЗ, к принципам программно-определяемого построения радиотехнического тракта оконечной аппаратуры космической линии связи. Классические аппаратные решения в области проектирования технических средств обмена информацией посредством радиоканала не предполагают возможности адаптации и работы существующей оконечной приёмной аппаратуры с перспективными космическими системами и аппаратами без её глубокой модернизации. Таким образом, находящиеся в настоящее время в эксплуатации комплексы приёма и обработки спутниковой геофизической информации, построенные в соответствии с принципами аппаратного формирования заданных технических характеристик, не отвечают современным требованиям, предъявляемым к космической составляющей системы метеорологического обеспечения войск.

Software Defined Radio — особый класс систем, реализующий принципы цифровой фильтрации в тракте обработки, подразумевающий представление физических сигналов в дискретной числовой форме. Реализация данного принципа позволяет описать передаточные характеристики сигнальных трактов программно-определяемых

радиотехнических систем в алгоритмическом виде с использованием машинных языков программирования.

Цифровой тракт обработки сигналов, являющийся основой архитектуры программно-определяемых радиотехнических систем, позволяет реализовать требуемые функциональные характеристики посредством программирования цифрового вычислительного устройства в составе тракта.

Программно-определяемые радиотехнические системы созданы с целью упрощения реализации преобразования и обработки информационных сигналов посредством сведения данных процессов к выполнению математических преобразования над числовыми последовательностями и формализации данной задачи на языке дискретной математики. В основе работы систем цифровой обработки сигналов и программно-определяемых радиотехнических систем в частности лежит идея работы с математическими аналогами физических сигналов – дискретными числовыми последовательностями, при этом физическим преобразованиям соответствуют эквивалентные математические преобразования на дискретных множествах.

Основной элемент архитектуры любой программно-определяемой радиотехнической системы – цифровой тракт обработки сигналов. Цифровой тракт в общем виде представляет собой вычислительное устройство, выполняющее преобразование над дискретными цифровыми сигналами в соответствии с определенным алгоритмом. Реализация комплексов обработки сигналов с применением SDR позволяет исключить сложные физические преобразования над информационными сигналами и выполнять их в цифровом тракте обработки сигналов с использованием алгоритмов цифровой фильтрации. Программируемое вычислительное устройство в тракте цифровой обработки может иметь произвольную архитектуру и строится на основе любых инженерно-технических решений, удовлетворяющих заданным требованиям производительности и информационной пропускной способности.

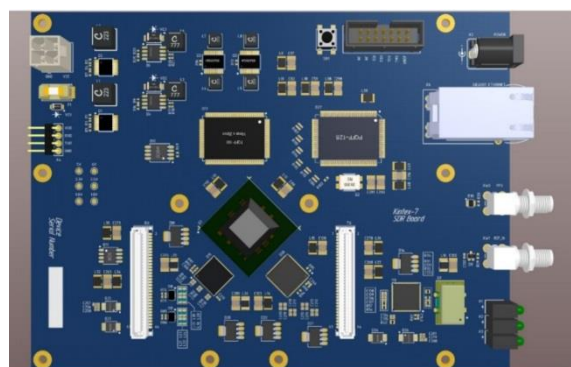
Применение элементов цифровой обработки сигналов – цифровых фильтров – в информационном тракте позволяет сформировать необходимые свойства и расширить функциональные возможности программно-определяемых радиотехнических систем по сравнению с системами, построенными на принципах физических преобразований над вещественными информационными сигналами. Важнейшим свойством цифровых трактов обработки информации и систем, построенных на их основе, является реконфигурируемость, что означает возможность изменения функциональных и параметрических характеристик тракта в зависимости от заложенного исполняемого алгоритма и программ обработки сигналов. То есть, один и тот же физический тракт обработки информации радиотехнической системы способен выполнять различные преобразования и осуществлять произвольные математические операции над информационными сигналами в соответствии с содержанием исполняемого управляющего программного кода, загруженного в память вычислительного устройства, реализующего тракт цифровой обработки. Данное свойство программно-определяемых систем позволяет оперативно изменять и адаптировать их внутреннюю логическую и функциональную структуру к работе с конкретными типами информационных сигналов, используемыми при передаче данных, путем загрузки в память программ системы соответствующих предварительно подготовленных программных модулей.

Посредством применения метода цифровой фильтрации в информационном тракте SDR систем алгоритмически могут быть реализованы дискретные математические операции и преобразования над информационными сигналами в числовом виде,

труднореализуемые над вещественными сигналами с применением физических функциональных преобразователей. Так, возможно алгоритмически описать цифровой фильтр с любой сколь угодно сложной специальной комплексной передаточной характеристикой с требуемой точностью, необходимый для реализации высокоэффективных видов манипуляции высокочастотного информационного сигнала. Характеристики таких цифровых фильтров и параметры тракта обработки, построенного на их основе, стабильны во времени, прогнозируемы с заданной точностью и идентичны от реализации к реализации, в отличие от физических трактов обработки и преобразования сигналов, подразумевающих наличие погрешностей, связанных с неидеальностью элементарных электронных компонент, входящих в состав физических преобразователей и модуляторов. Цифровые фильтры не имеют параметрических зависимостей от условий внешней среды, поскольку отклик таких фильтров детерминирован алгоритмически, преобразования выполняются над абстрактными числовыми объектами и не существует функциональной зависимости между физическими параметрами внешней среды и векторами состояний цифровых фильтров.

Важное значение имеет возможность работы в тракте цифровой обработки сигналов с абстрактными объектами и выполнения математических преобразований над ними, не имеющих прямых физических аналогов и непосредственно не осуществимых над вещественными сигналами. Так, удобно представление радиотехнических сигналов и выполнение преобразований над ними в комплексном виде, что значительно снижает сложность алгоритмов цифровой фильтрации.

На современном этапе развития радиотехники и методов цифровой обработки сигналов, трудоемкость проектирования и реализации физических фильтров со сложной передаточной функцией, необходимых для обработки широкополосных высокоскоростных информационных сигналов с нетривиальной структурой спектра в частотной области, много больше трудоёмкости проектирования цифровых фильтров с соответствующими характеристиками и реализации их в тракте цифровой обработки сигналов. В то же время, с целью максимально эффективного использования пропускной способности каналов передачи данных и частотного спектра космических радиолиний в частности, необходимо использование сложных видов модуляции высокочастотного радиосигнала с применением специальных законов изменения мгновенных значений амплитуды и фазы и требующих наличия в тракте обработки формирующих фильтров с импульсными передаточными характеристиками, аналитически описываемыми дискретными функциями комплексных переменных, принципиально не воспроизводимыми физически реализуемыми электронными преобразователями, функционирующими в пространстве вещественных сигналов.



**Рис. 1. Макет программно-определяемого радиоприемного устройства.**

В ВКА имени А.Ф.Можайского авторским коллективом разработан макет SDR приемника, способного функционировать в тракте приёма данных от космических аппаратов ДЗЗ и обеспечивающий требуемые технические характеристики. Макет выполнен на многослойной печатной плате размерами 200x200 мм (Рисунок 1).

Для управления приводом антенны и приемником требуется вычислительная машина, которая может располагаться в одном корпусе с приемником (Рисунок 2,3).

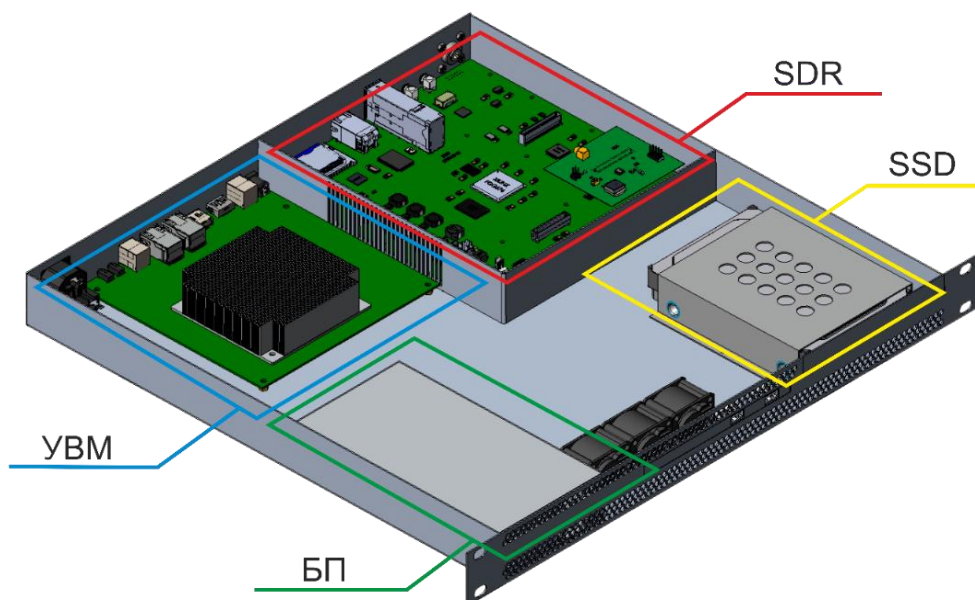


Рис. 2. Трёхмерная модель размещения аппаратуры в 19" корпусе.



Рис. 3. Трёхмерная модель размещения аппаратуры в стойке.

При этом достигнуты характеристики, обеспечивающие прием данных от современных, и перспективных КА ДЗЗ:

- ширина полосы пропускания 50 МГц;
- частота дискретизации АЦП 100 МГц;
- разрядность АЦП 16 бит;
- чувствительность приёмного тракта -120 дБм;
- динамический диапазон по блокированию 90 дБ;
- избирательность по соседнему каналу > 60 дБ;
- относительный нормированный уровень собственных шумов приёмного тракта -70 дБ;
- минимальный коэффициент децимации в цифровом тракте SDR 4

Приёмный тракт прототипа изделия построен по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты. При этом первое преобразование выполняется аналоговым квадратурным демодулятором, на выходе которого присутствуют две ортогональные базисные составляющие исходного сигнала, перенесенные на нулевую промежуточную частоту. Далее, после фильтров низкой частоты, выполняется аналогово-цифровое преобразование квадратурных составляющих исходного сигнала и их представление в комплексной форме. Второе преобразование частоты производится численно умножением на множество комплексных чисел дискретизированного сигнала и отсчётов опорного цифрового генератора прямого синтеза (Numerical Controlled Oscillator – NCO), при этом происходит соответствующее преобразование сигнала в частотной области.

Реальная чувствительность и избирательность приёмного тракта измерены с использованием прецизионных измерительных приборов и применением стандартных методик.

Функциональная схема аппаратной части приёмного комплекса представлена на рисунке 4.

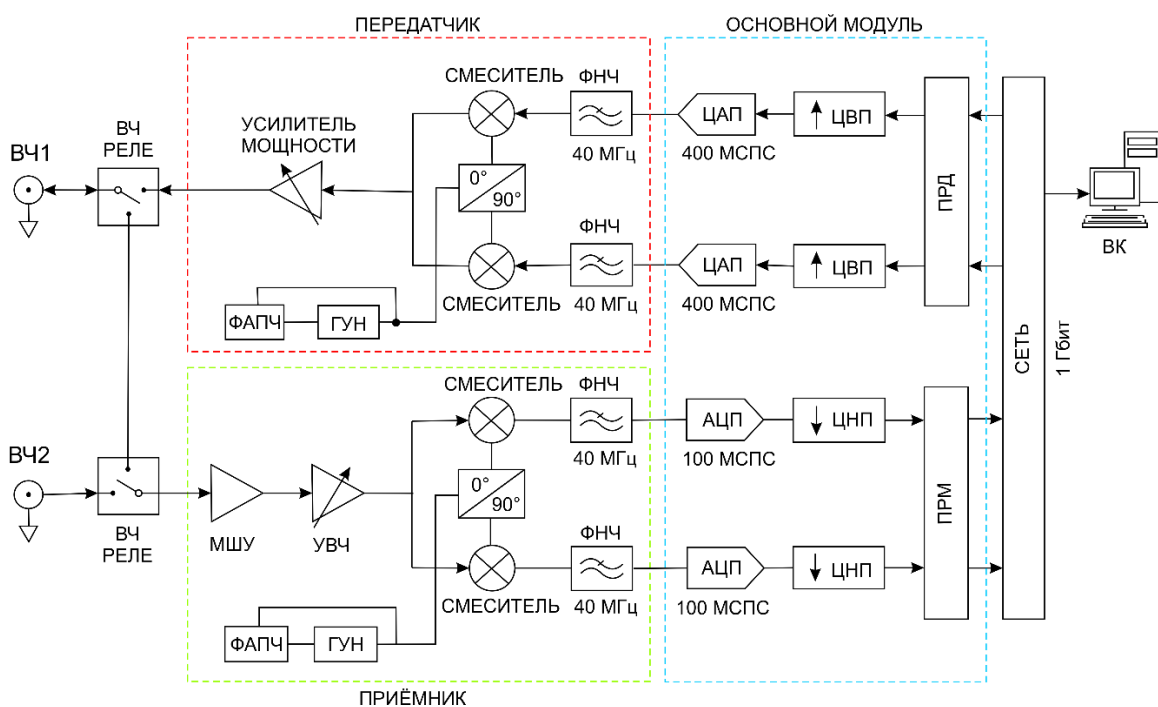


Рис. 4. Функциональная схема аппаратной платформы SDR.

На схеме показаны основные составляющие части комплекса и взаимосвязи между ними. Комплекс представляет собой самостоятельное изделие и включает:

- приёмный канал, высокочастотные квадратурные демодуляторы, антенные коммутаторы;
- передающий канал, высокочастотные квадратурные модуляторы;
- основной модуль цифрового преобразования и обработки сигналов;
- сетевой интерфейс, управляющую универсальную вычислительную машину.

В ходе работы построен действующий макет наземного приемного комплекса, реализующего принцип программно-определяемого радио, и показана эффективность его применения в рамках решения задач приёма спутниковой информации ДЗЗ.

Получены данные измерений инструментами, размещенными на борту зарубежных и отечественных аппаратов ДЗЗ, отработана методика анализа и обработки сигналов космических аппаратов различных спутниковых систем.

Построенный макет способен осуществлять приём информации большинства существующих космических систем метеорологического назначения. Аппаратно-программный комплекс может быть использован для изучения и радиотехнического анализа информационных сигналов космических аппаратов.

### **Литература**

1. Предложения по совершенствованию перспективных геофизических космических систем и аппаратов на период до 2020 г.: Отчёт о НИР «Вымпел-564-ВКА» Ч.1./ВКА имени А.Ф. Можайского. – СПб., 2004. – 47с.
2. R. J. Lackey and D. W. Upmal, Speakeasy: The Military Software Radio, IEEE Communications Magazine, May 1995.