

УДК 621.396.946 EDN SGPKVC

Тенденции улучшения тактико-технических характеристик аппаратуры управления космическими аппаратами применительно к малым космическим аппаратам

А. В. Алыбин, *Alyibin.AV@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Яхутин, *аспирант, contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. С. Семочкин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г. Б. Павлов, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Буянкин, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей работе рассмотрены тенденции и основные принципы улучшения тактико-технических, а также эксплуатационных характеристик бортовой аппаратуры управления космического аппарата (КА). Предложены и детально рассмотрены архитектура и технический облик модуля приемо-передающего устройства из состава бортовой аппаратуры управления КА, описаны ключевые узлы модуля приемо-передающего устройства, а также предложен вариант их построения по технологии «система-в-корпусе» и «система-на-кристалле». Подробно описана архитектура цифровой части модуля приемо-передающего устройства, построенная с применением двух независимых каналов приема, организованных за счет двух независимых связанных подсистем, включающих в себя конвейеры обработки данных. Рассмотрены основные проблемные вопросы, возникающие при проектировании подобных устройств, в том числе связанные с временем поиска фазы псевдослучайной последовательности. Приведены основные интерфейсы, требуемые для стыковки и взаимодействия с устройствами бортовой аппаратуры управления КА, с бортовым вычислительным устройством и другими системами КА. Описана техническая реализация цифровой части модуля приемо-передающего устройства с учетом существующих в настоящее время в Российской Федерации технологий, а именно HCMOS8D. Описаны основные тактико-технические характеристики высокочастотных узлов модуля приемо-передающего устройства, приведены структурные схемы, описана конструкция, рассмотрены варианты построения данных узлов с учетом производственно-технической базы АО «Российские космические системы». В настоящее время АО «Российские космические системы» выполняет ряд работ по макетированию предложенных технических решений, изложенных в данной статье.

Также в работе предложен облик перспективной аппаратуры управления малыми космическими аппаратами, включающий в себя приемо-передающее дешифрирующее устройство (ППДУ), включающее в себя функционал МППУ и дешифратор командно-программной информации; приведен функционал с учетом интеграции в цифровую часть аппаратуры ряда функций, в настоящее время существующих в составе отдельных приборов и модулей.

Ключевые слова: малые космические аппараты, командно-измерительные системы, бортовая аппаратура, цифровое приемное устройство, «система-в-корпусе», «система-на-кристалле»

Trends in Improving the Functional Capabilities of Spacecraft Control Equipment, as Applied to Small Spacecraft

A. V. Alybin, *Alyibin.AV@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. A. Yakhutin, *postgraduate student, yakhutin.sa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. S. Semochkin, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

G. B. Pavlov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Buyankin, *buyankin.av@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. In this paper, the trends and basic principles of improving the functional capabilities, as well as operational characteristics of the onboard control equipment of the spacecraft are considered. The architecture and technical appearance of the receiving and transmitting unit of the onboard control equipment of the spacecraft are proposed and considered in detail, the key nodes of the receiving and transmitting unit are described, and a variant of their construction using the system-in-the-case and system-on-a-chip technologies is proposed. The architecture of the digital part of the receiving-transmitting unit is described in detail, built using two independent receiving channels organized by two independent connected subsystems, including data processing conveyers. The main problematic issues arising in the design of such devices are considered, including those related to the search time of the pseudorandom sequence phase. The main interfaces required for docking and interaction with the devices of the spacecraft onboard control equipment, with the onboard computing device and other spacecraft systems are given. The technical implementation of the digital part of the receiving and transmitting device module is described, taking into account the technologies currently existing in the Russian Federation, namely HCMOS8D. The main tactical and technical characteristics of the high-frequency nodes of the receiving and transmitting unit are described, structural diagrams are given, the design is described, and options for constructing these nodes are considered taking into account the production and technical base of JSC "Russian Space Systems". Currently, JSC "Russian Space Systems" performs a number of works on the layout of the proposed technical solutions described in this article.

The work also proposes the design of promising control equipment for small spacecraft, including a transmit-receive decoding device, which includes the functionality of a transceiver unit and a decoder of command-software information. Its functionality is given taking into account the integration of a number of functions into the digital part of the equipment, currently only existing as parts of individual devices and modules.

Keywords: small spacecraft, command and measurement systems, on-board equipment, digital receiver, "system-in-the-case", "system-on-a-chip"

Введение

В настоящее время в рамках проекта «Сфера» и др. существует необходимость развертывания многоспутниковых группировок. При этом особые требования предъявляются к малым космическим аппаратам (МКА). Особенно необходимо выделить в этих условиях необходимость уменьшения габаритов и массы. Одним из наиболее эффективных решений этих проблем является создание микроэлектронных модулей, входящих в состав бортовой аппаратуры.

Ключевым устройством для аппаратуры управления космическим аппаратом является МППУ на основе микроэлектронных модулей (МЭМ), обеспечивающий высокую точность радиометрических измерений и обладающий малой массой и габаритами, что особенно актуально для аппаратуры управления малыми космическими аппаратами [1, 2]. Структурная схема МППУ показана на рис. 1.

«Функциональные узлы МППУ объединены в три типа МЭМ: МЭМ высокочастотной приемной части (ВЧ ПРМ), МЭМ цифровой обработки

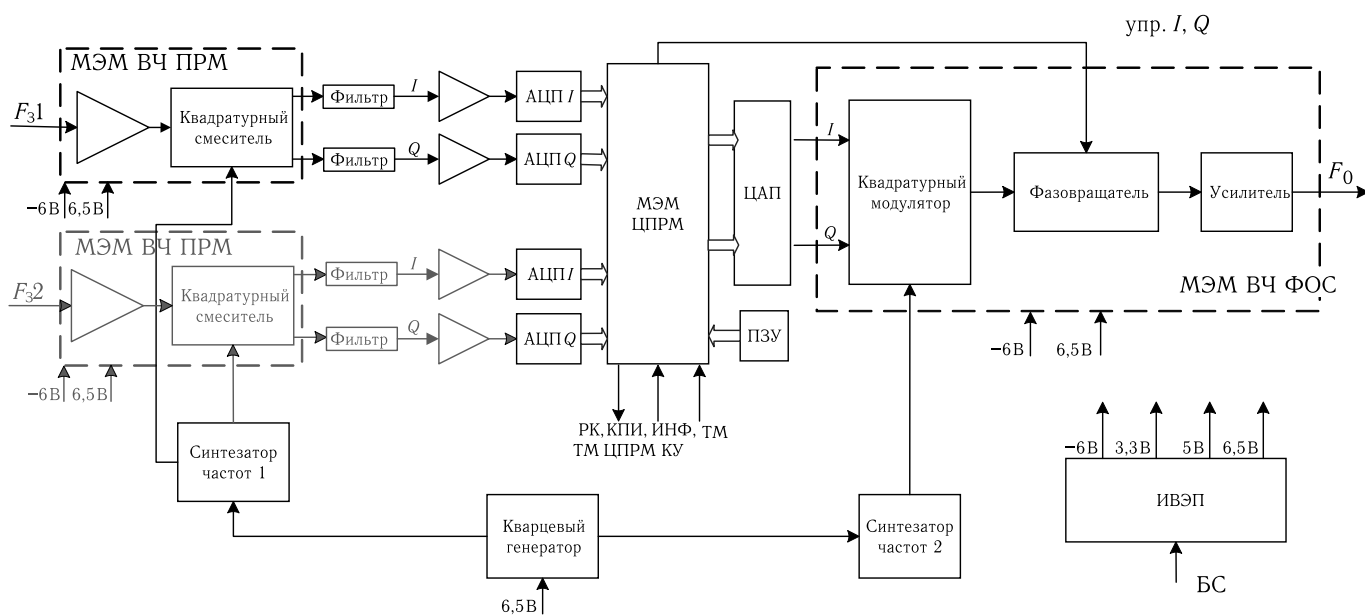


Рис. 1. Структурная схема ППУ с разделным приемом информации

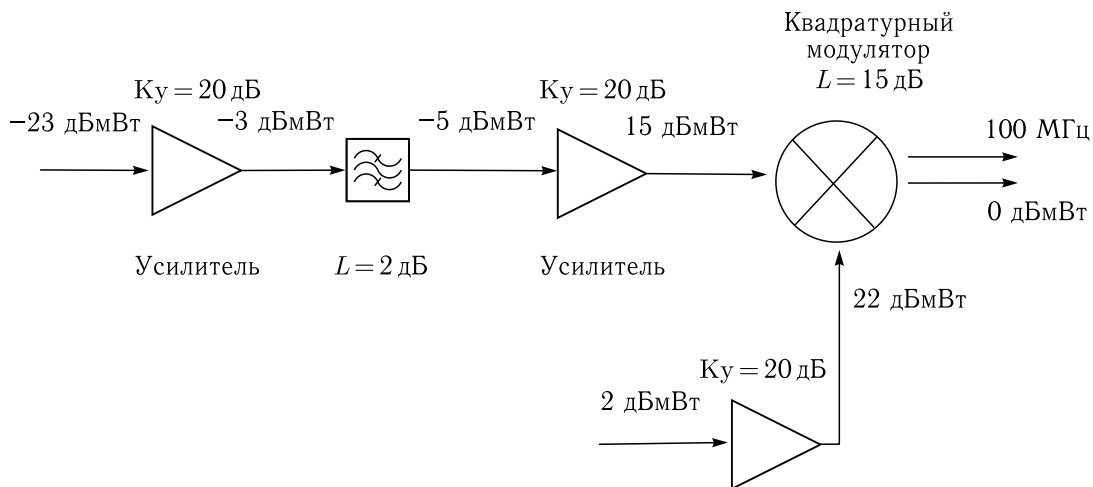


Рис. 2. Структурная схема МЭМ ВЧ ПРМ

сигнала (ЦПРМ) и МЭМ высокочастотной части формирователя ответного сигнала (ВЧ ФОС). Для раздельного приема информации, поступающей из двух приемных антенно-фидерных систем, предусмотрены два МЭМ ВЧ ПРМ, предназначенные для приема сигналов, их усиления с помощью усилителя, входящего в состав МЭМ ВЧ ПРМ, преобразования на промежуточную частоту в квадратурном модуляторе и передачи квадратурных сигналов через аналого-цифровые преобразователи (АЦП) в МЭМ ЦПРМ с предварительным усилением находящимися вне МЭМ операционными усилителями» [3] (рис. 2).

Квадратурные модуляторы обеспечивают в сочетании с синтезатором частот перестройку промежуточной частоты на требуемое литерное значение.

Основным фактором, определяющим структуру МЭМ ЦПРМ, является требование обеспечить минимальные массу и габариты, энергопотребление, а также параллельную обработку сигналов из двух источников для надежного функционирования системы управления при неориентированном полете космического аппарата.

МЭМ ЦПРМ — отечественного производства, внутри которого реализованы все функции по обработке сигнала запросного и формированию сигнала ответного каналов.

На рис. 3 показана структурная схема кристалла МЭМ ЦПРМ [4].

Архитектура кристалла МЭМ ЦПРМ представляет собой интегральную микросхему, выполненную по концепции «система-на-кристалле» [4].

Контроллер прямого доступа в память (ПДП) устанавливает порядок обмена данными между блоками конвейера обработки данных и массивом оперативной памяти, следит за приоритетом доступа и обеспечивает бесшовную передачу управления транзакциями на шине от одного блока к другому. Блоки конвейера обработки данных выполняют монотонно-однообразную обработку потоковых данных, требующую высокой скорости выполнения однотипных операций. К такой обработке относятся входная фильтрация сигнала с АЦП; приведение этого сигнала к стандартному уровню (цифровая автоматическая регулировка усиления, АРУ); функционирование петель слежения за фазой несущего колебания и кодом псевдослучайной последовательности (ПСП), применяемого для прямого расширения спектра принимаемого сигнала и демодуляция принятых символов. Разнообразные и вычислительно незатратные задачи, такие как организация обмена с бортовыми приборами при помощи периферийных интерфейсов, формирование циклограммы работы цифрового приемника, формирование телеметрических сигналов и переключение режимов работы блоков конвейера цифровой обработки сигналов, ложатся на плечи центрального процессорного устройства (ЦПУ).

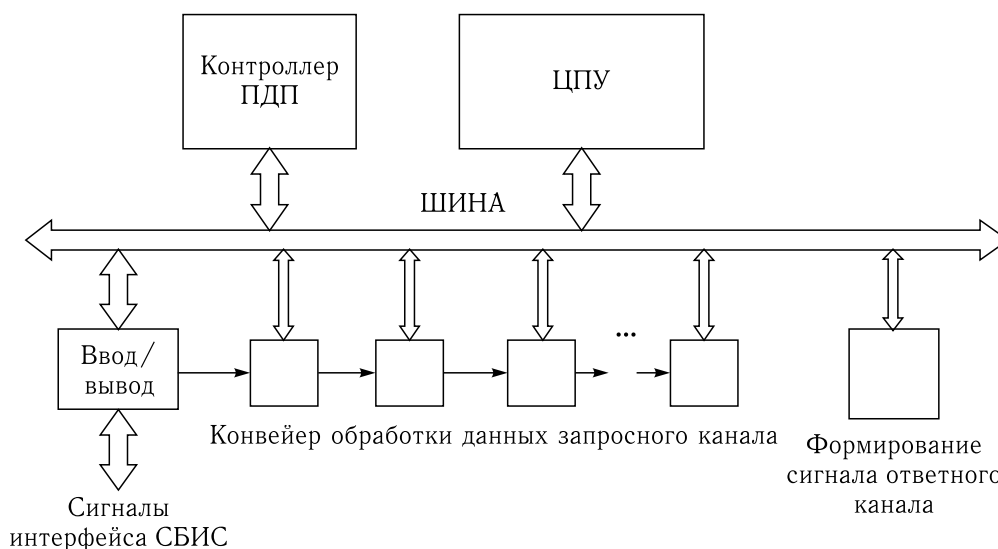


Рис. 3. Структурная схема кристалла МЭМ ЦПРМ

Для работы с внешними приборами в состав периферийных устройств в МЭМ ЦПРМ входят 6 линий UART с импульсным представлением битов передаваемой информации для возможности организации трансформаторной гальванической развязки, 3 резервированных интерфейса SpaceWire для возможности будущей модернизации, аппаратуры управления космическим аппаратом в соответствии с современными требованиями к обмену информацией по бортовым интерфейсам, 6 последовательных интерфейсов SPI для конфигурирования и управления микросхемами синтезатора частот, АЦП и ЦАП и интерфейс ИРСР для передачи телекомандной информации.

В состав конвейера цифровой обработки сигнала входят 32 аппаратных коррелятора для быстрого обнаружения фазы ПСП принимаемого сигнала, что позволяет выполнять поиск широкополосного сигнала в полосе 128 кГц за время не более 250 мс при ширине шумовой полосы в 1 кГц.

Реализация в конвейере цифровой обработки сигнала двух однотипных приемных подсистем позволяет осуществлять независимый прием телекоманд одновременно через две различные антенны, что положительно сказывается на возможности исключить влияние интерференции при нахождении наземной станции управления в зоне перекрытия диаграмм направленности принимающих антенн.

Физическая реализация описанной архитектуры на технологическом процессе HСMOS8D (180 нм) при использовании специализированных библиотек и методов защиты от эффектов, вызываемых воздействием ионизирующих излучений космического пространства, требует кристалла площадью 322 мм².

Высокие требования к динамическим характеристикам петли слежения за скоростью объекта в условиях предельных уровней шума находятся в противоречии с требованиями по точности оценки скорости и по времени вхождения в синхронизм.

Также предъявляют чрезвычайно высокое требование к уровню случайной ошибки оценки фазы ПСП. Острота этой проблемы несколько снимается умеренностью требований по динамике фазы ПСП. Тем не менее выбору параметров петли слежения за фазой ПСП и исследованию ее шумовых характеристик следует уделить серьезное внимание.

Также узким местом оказывается время поиска фазы ПСП в условиях высокого уровня шума. При времени поиска в 10 с и последовательном переборе примерно 10 000 вариантов фазы ПСП на принятие решения по данному варианту отводится 1 мс. Для обеспечения сопоставимого времени захвата при начальной неопределенности ± 50 кГц собственная частота петли слежения за несущей (ее шумовая полоса) должна составлять порядка 10 кГц. Но работоспособность петли с такой шумовой полосой возможна только при весьма умеренных уровнях шума. При повышении уровня шума время захвата петли катастрофически растет, что приводит к недопустимо большим временам поиска последовательным перебором. Заданное требование по времени поиска можно выполнить применением алгоритма формирования совместной оценки фазы ПСП/частоты несущей по отрезку сигнала достаточно большой длительности. Однако вычислительная сложность этого алгоритма быстро растет по длительности отрезка.

Конвейер обработки данных запросного канала

«Проработка структуры конвейера запросного сигнала является центральным моментом разработки архитектуры СБИС в целом. Здесь сосредоточены все функции по обработке запросного сигнала — поиск, слежение за фазами несущей и ПСП, выделение данных.

Условно его можно разделить на соединенные в тандем части:

- блок первичной обработки (выделение квадратурных составляющих, подавление внеполосных компонент, прореживание);
- блок поиска/слежения (петли слежения за фазами несущей и ПСП)» [4].

Архитектура блока поиска/слежения, структура VCO, структура генератора ПСП, работа формирователя фазовой ошибки и петлевого фильтра ФАПЧ описаны в [4].

Введение в архитектуру блока поиска/слежения некоторых дополнительных средств позволит без существенного усложнения аппаратной реализации существенно расширить диапазон возможных приложений реализованной СБИС.

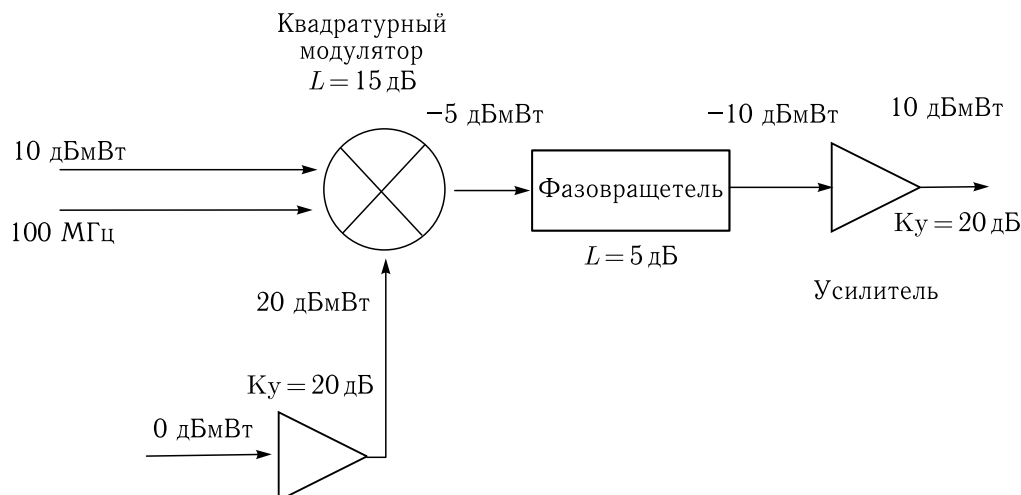


Рис. 4. Структурная схема МЭМ ВЧ ФОС

Для этого следует реализовать возможность перевода петли ФАПЧ в режим Костаса. Реализация этого режима позволит использовать СБИС для демодуляции BPSK-сигналов с подавленной несущей.

Аппаратно добавление режима петли Костаса достигается введением дополнительного умножителя, реализующего возведение в квадрат отсчетов с выхода умножителя на опорную несущую. Того же эффекта можно достичь перепрограммированием таблиц квантования по угловым секторам в формирователе фазовой ошибки.

Как один из вариантов следует изучить использование петли Костаса и в режиме приема реального сигнала с искусственно добавленной несущей. Для этого на вход формирователя фазовой ошибки достаточно добавить режекторный фильтр, реализующий подавление добавленной несущей.

МЭМ ПРМ предназначен для работы в составе унифицированных интегрируемых бортовых систем космических аппаратов, имеющих повышенные тактико-технические и эксплуатационные характеристики по отношению к аналогичным системам, используемым в настоящее время.

МЭМ ФОС предназначен для формирования, усиления и передачи на входы усилителей мощности (антенно-фидерного устройства) СВЧ-сигнала С-диапазона частот с модулированной частотой излучения.

Структурная схема МЭМ ВЧ ФОС представлена на рис. 4.

Выходная мощность МЭМ ФОС не менее 5 мВт. Ток потребления не более 300 мА.

Для питания МЭМ ФОС требуется высокостабильное питание и управление (3,3 В, -5 В, 5 В).

Осуществление контактирования между МЭМ и цифровыми платами или разъемами через конструкцию типа QFN. На рис. 5 представлена конструкция МЭМ.

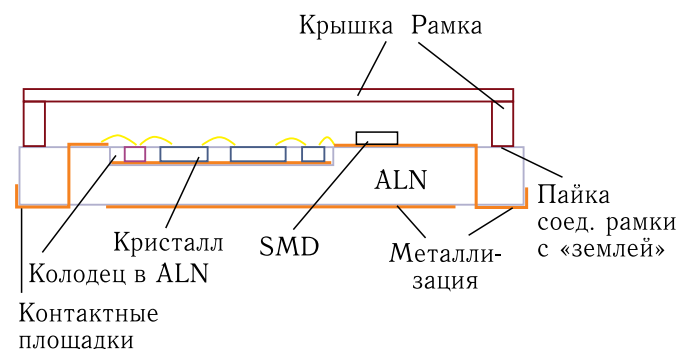


Рис. 5. Конструкция МЭМ ВЧ ФОС

Характерной особенностью всех МЭМ из состава МППУ является их реализация с помощью МЭМ ЦПРМ по концепции «система-на-кристалле» и ВЧ-кристаллов, чем обеспечиваются малые габариты и масса МППУ, а также импортнезависимость.

С учетом вышеизложенного предлагается архитектура построения аппаратуры управления КА на базе интегрированного приемно-передающего устройства (ППДУ), показанная на рис. 6.

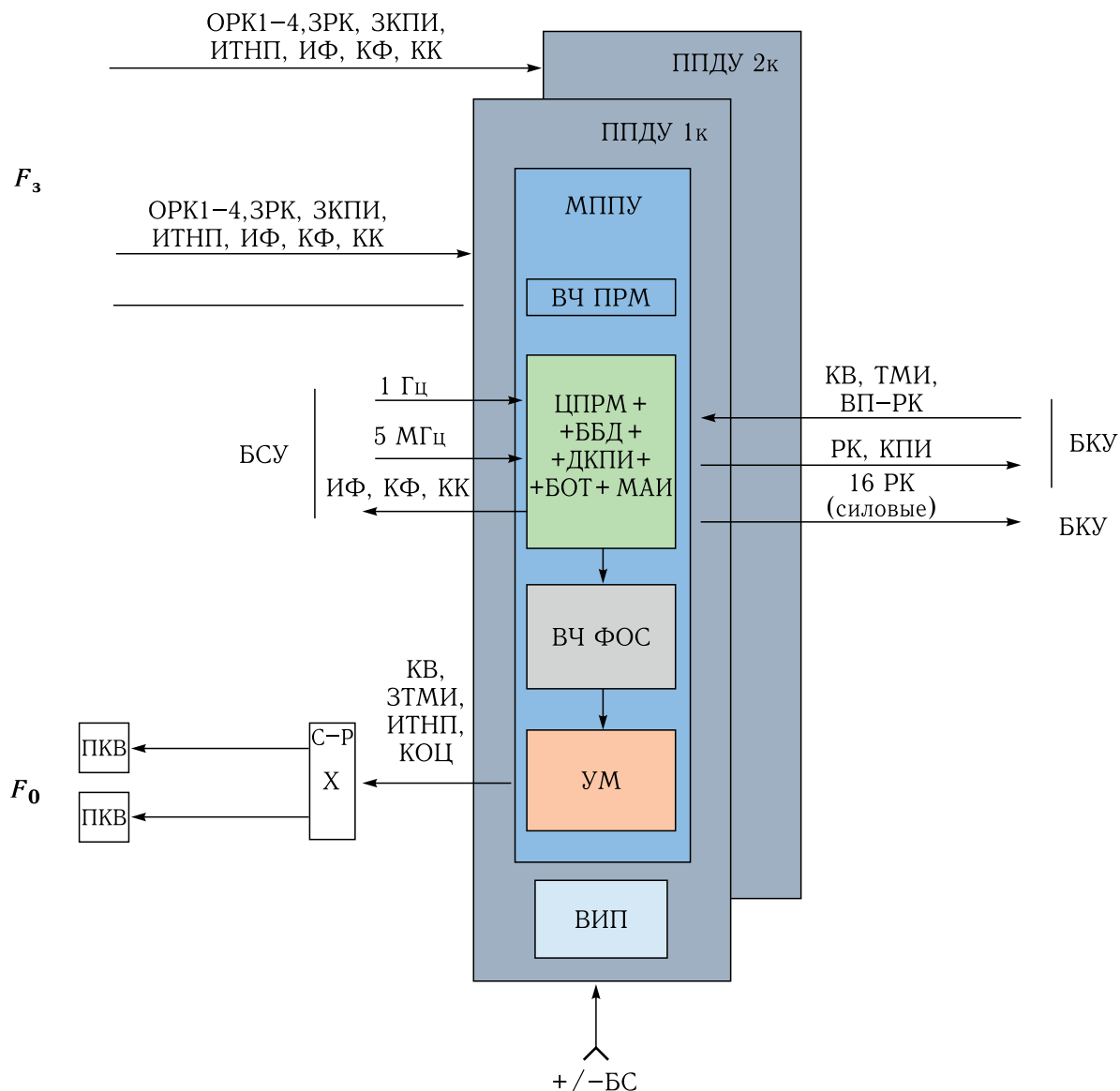


Рис. 6. Архитектура построения аппаратуры управления КА на базе интегрированного ППДУ

ППДУ, включающее в себя ВЧ МЭМ построенные по принципу «система-в-корпусе», а также МЭМ ЦПРМ, реализованный по принципу «система-на-кристалле», обеспечивает:

- выделение и обработку информации, принятой по запросному каналу;
- формирование ПШО сигнала измерения дальности беззапросным методом;
- формирование ответного сигнала;
- сбор и формирование пакета собственной ТМИ БА КИС;
- обработку ТМИ, поступающей от БКУ;
- формирование штатного ТМ-кадра.

Выводы

Предлагаемая архитектура построения бортовой аппаратуры управления КА с учетом вышеизложенного позволяет достичь следующих результатов:

- улучшение технических характеристик, а именно улучшение чувствительности МППУ из состава бортовой аппаратуры управления КА, повышение скорости обмена информацией (в том числе для закладки больших массивов КПИ в бортовой комплекс управления), увеличение энергетического потенциала

- радиолинии за счет новых сигнально-кодовых конструкций;
- улучшение эксплуатационных характеристик в части непрерывного контроля за состоянием бортовой аппаратуры управления КА и возможности непрерывной передачи телеметрии, а также улучшение помехозащищенности радиолинии;
 - переход на отечественное производство микроэлектронных модулей, построенных по принципу «система-в-корпусе» и «система-на-кристалле» не только позволит обеспечить существенное снижение массы и габаритов бортовой аппаратуры, но также и обеспечит повторяемость изделия, прогнозируемые сроки закупки ЭРИ, изготовления и поставки бортовой аппаратуры.

Список литературы

1. Булгаков Н.Н., Алыбин В.Г., Кривошеин А.А., Семочкин А.С. Бортовая аппаратура командно-измерительной системы для космических аппаратов ГЛОНАСС: результаты эксплуатации и перспективы развития // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014. Т. 1, вып. 2. С. 65–73.
2. Алыбин В.Г., Семочкин А.С. Управление современными космическими аппаратами // 28 Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии “КрыМиКо 2018”». Материалы конференции. Москва, Минск, Севастополь. 2018. С. 272–284.
3. Булгаков Н.Н., Сидоренко И.Е., Семочкин А.С., Алыбин А.В., Буянкин А.В., Рахвалов В.В., Филатов И.В. Перспективное приемо-передающее устройство системы для управления космическими аппаратами на основе микроэлектронных модулей преобразования высокочастотных сигналов и цифровой обработки сигнала // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 29 ноября – 3 декабря 2021 г. МФТИ, 2021. 355 с.
4. Григорьев А.А., Медова Л.Р., Рыжаков М.В., Буркина М.С., Булгаков Н.Н., Круглов А.В., Сидоренко И.Е., Кривошеин А.А., Алыбин А.В., Алыбин В.Г., Царьков А.В., Филатов И.В. Перспективная плата ЦПРМ для приемо-передающего унифицированного устройства командно-измерительной системы для управления космическим аппаратом // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6, вып. 4. С. 13–23.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.09.2023
Дата принятия рукописи
в печать 23.01.2024