УДК 004.41, 004.4’2
DOI 10.26732/j.st.2025.2.01

КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПУТНИКОВ СВЯЗИ, НАВИГАЦИИ И ГЕОДЕЗИИ

А. А. Колташев✉, С. Г. Кочура
АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М. Ф. Решетнёва»
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Статья подводит итог более чем сорокалетнему периоду развития технологии создания и сопровождения бортового программного обеспечения космических аппаратов в Акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (в настоящее время АО «РЕШЕТНЁВ») и содержит обзор ключевых аспектов, делающих эту технологию эффективной: ПО спутника разрабатывается как совокупность ПО систем спутника, рассматриваемых как ПО, встроенное в эти системы; ПО систем спутника функционируют в единой аппаратно-программной среде и разрабатываются на единых средствах по единой технологии; система поддержки проектирования, системного тестирования и сопровождения ПО строится на основе информационной модели ПО спутника и системе архивов объектов разработки; среда разработки, автономного тестирования и верификации программ ПО систем строится на основе кросс-системы программирования на языке Модула-2, содержащей интерпретаторы команд бортовых компьютеров; переносимость функционального ПО на новую вычислительную платформу обеспечивается постоянством программных интерфейсов и специальными методами адаптации унифицированной бортовой ОС для новых вычислительных платформ; управление качеством, базируется на качестве компонент ПО, качестве управления конфигурацией ПО и качестве верификации и подтверждения ПО в целом; трёхуровневое управление объектами и работами; использование программных моделей спутников как для целей системного тестирования ПО спутника, так и для его сопровождения при эксплуатации.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовой компьютер, программная инженерия, технология разработки программного обеспечения спутников.

Поступила в редакцию: 09.04.2025. Принята к печати: 02.07.2025.

Введение

Развернутый обзор современной технологии разработки и сопровождения бортового программного обеспечения (БПО) космических аппаратов, используемой в АО «РЕШЕТНЁВ», впервые был представлен в статьях, опубликованных в журнале «Наукоёмкие технологии» в 2014 году [1, 2]. К этому моменту в АО «РЕШЕТНЁВ» было создано четыре вычислительные платформы. В этих статьях содержится библиография по принципам и методам, положенным в основу создания этой технологии. Средства разработки, применяемые в технологии, детально рассмотрены в публикации 2018 года в журнале «Космонавтика и ракетостроение» [3]. В данной статье будут рассмотрены только аспекты, не отраженные в предыдущих публикациях.

Всего с момента начала создания первого космического аппарата с бортовым компьютером (КА Космос-1366, запущен в 1982 году) в АО «РЕШЕТНЁВ» создано шесть вычислительных платформ и произведен запуск 130 подобных КА связи, навигации и геодезии. На 130-м спутнике – КА Космос-2569, запущенном в 2023 году, шестая вычислительная платформа использована впервые.

Понятие вычислительной платформы охватывает три составляющих – это бортовой компьютер

✉ kaa216@iss-reshetnev.ru
© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

(БК) определенной архитектуры, операционная система (ОС) реального времени для этого компьютера и средства разработки и сопровождения программ БПО, функционирующих в среде этой операционной системы на этом компьютере.

Для каждой вычислительной платформы в АО «РЕШЕТНЁВ» создаются:

− унифицированное ядро ПО БКУ КА, включающее ОС и создающее среду программного функционирования и программного управления для ПО систем КА;

− средство разработки и автономного тестирования программ БПО – кросс-система программирования на языке программирования Модула-2;

− средство системного тестирования БПО, включающее программную модель КА, состоящую из моделей аппаратуры БКУ КА и модели поведения систем КА.

Эти средства, конечно, сохраняют типовые пользовательские и программные интерфейсы БПО и средств разработки БПО, единые для всех вычислительных платформ, что обеспечивает высокую степень унификации и переносимости БПО на различные вычислительные платформы и существенно снижает риски, возникающие при этом. Однако в ситуации, когда распространение функционально одинаковых программ осуществляется на платформы с разными характеристиками бортовых компьютеров и КА с разной целевой аппаратурой, требуются новые решения в управлении конфигурацией и системном тестировании БПО, особенно при сопровождении функционирующих КА и особенно в аспекте распространения доработок БПО в процессе штатной эксплуатации КА.

Сводная информация по внедренным вычислительным платформам приведена в таблице.

В основу принципов построения и развития технологии создания БПО для этих платформ была положена концепция, базирующаяся на следующем определении: «Технология разработки программного обеспечения – это совокупность методов и средств, реализуемых в процессе производства программного обеспечения, с целью изготовления программного продукта определенного класса (1) с требуемым уровнем качества (2), в установленные сроки (3) и с использованием заданного количества ресурсов (4)» [4].

Технологии разработки и сопровождения БПО спутников, как и всякая технология, базируются на трех «китах» – создаваемых объектах, выполняемых работах и используемых инструментальных средствах [5].

1. Объекты

1.1. БПО спутника разрабатывается как совокупность ПО систем спутника, рассматриваемых как программное обеспечение, встроенное в эти системы, которое проектируется, программируется, тестируется и подтверждается в рамках соответствующей системы спутника.

1.2. ПО одной из систем (в случае АО «РЕШЕТНЁВ» эта система называется – бортовой комплекс управления (БКУ) спутника) решает все интегральные вопросы БПО и предоставляет другим системам среду программного функционирования и среду программного управления с постоянными программными интерфейсами.

1.3. ПО систем спутника функционируют в единой аппаратно-программной среде, предоставляемой системой БКУ, и разрабатываются по единой технологии с использованием единых инструментальных средств.

2. Работы

2.1. Проектирование и системное тестирование ПО систем спутника, выполняемые проектантами систем спутника, и системное тестирование

Таблица

Платформа	Период	Проекты
Язык программирования	-	*Ассемблер (**24КА**)*
С-4 (IBM-360) КСП CAMV	1982- 2000- 2015	Поток, Луч, Галс, Экспресс, Экспресс-А и др. **CECAT**
Язык программирования	-	*Модула-2 (**106 КА**)*
OBC-1750(MIL-STD-1750) КСП М2–1750/С-1750	2003-	Экспресс-АМ (11, 22, 1, 2, 3, 33, 44)
С-32 (VAX-11/750) КСП М2-VAX	2003-	Глонасс-М, Ямал-300К (401), Экспресс-АМ (5, 6, 8, АТ1/АТ2), KazSat-3 и др.
БИВК (MIPS-III) КСП М2-MIPS	2011-	Глонасс-К, Луч-5 (А, Б, В) и др.
С-32М1 (SPARC) КСП М2-SPARC	2020-	Экспресс-80/103, Экспресс-АМУ3/АМУ7, AngoSat-M и др.
БИВК-М (PowerPC) КСП М2-PPC	2023-	Глонасс-К2

БПО в целом, выполняемое проектантами, создающими ПО БКУ.

2.2. Детальное проектирование, программирование и автономное тестирование программ ПО систем спутника, выполняемые программистами систем спутника.

2.3. Управление конфигурацией БПО, включая его интеграцию и изготовление, выполняемое специалистами, создающими ПО БКУ.

3. Средства

3.1. Автоматизированная система поддержки проектирования, системного тестирования и сопровождения БПО на основе информационной модели БПО спутников, системы архивов объектов разработки, включая наборы их тестов, и средств системного тестирования, использующих программные модели спутников.

3.2. Интегрированная среда разработки, автономного тестирования и верификации программ ПО систем на основе многоплатформенной кросс-системы программирования на языке Модула-2.

3.3. Автоматизированная система сопровождения программ, изделий и документов БПО со средствами электронного распорядительного документооборота, имеющая в своем составе средства изготовления БПО.

Ключевыми составляющими этой концепции в аспекте создания и сопровождения БПО спутников являются управление качеством, базирующееся на качестве компонент БПО, качестве управления конфигурацией БПО и качестве верификации и подтверждения БПО, и управление объектами и работами, при котором выделяется три уровня конфигурационных единиц – компонента ПО подсистемы КА, сборка ПО подсистемы и выпуск БПО, и три распорядительных документа, управляющие их созданием – Задание-Заключение на разработку компоненты или сборку ПО подсистемы, Запрос-Отчет на создание или доработку ПО подсистемы и Отчет о проблеме в программном обеспечении.

Важную роль также играют: подход к определению БПО, существенно упрощающий его разработку и сопровождение; использование для верификации и подтверждения БПО методов и средств программного (имитационного) моделирования, а также методы и средства подготовки технологии разработки БПО КА к освоению новых вычислительных платформ.

В АО «РЕШЕТНЁВ» накоплен большой опыт подготовки технологии разработки БПО к использованию в составе бортовых комплексов управления КА новых бортовых компьютеров.

Эффективная переносимость функционального БПО на новую вычислительную платформу обеспечивается постоянством и свойствами используемого языка программирования и средств разработки БПО и постоянством программного интерфейса, предоставляемого бортовой ОС.

Подход АО «РЕШЕТНЁВ» в решении вопроса адаптации унифицированной бортовой ОС при переходе на новую вычислительную платформу состоит в определении и минимизации зависимого от архитектуры процессора микроядра ОС, предоставляющего оптимальный и уже архитектурно-независимый программный интерфейс для реализации архитектурно-независимым образом максимального числа функции и компонент ОС. Эти функции и образуют тот самый постоянный программный интерфейс для функционального программного обеспечения, который и обеспечивает полную переносимость функциональной части БПО.

Разработанный в АО «РЕШЕТНЁВ» архитектурно-независимый интерфейс микроядра бортовой ОС был успешно реализован при внедрении четвертой вычислительной платформы и всех последующих.

В технологии разработки бортового программного обеспечения спутников, создаваемых АО «РЕШЕТНЁВ», на этапах автономного и системного тестирования используются программные модели бортовых компьютеров спутников.

На этапе автономного тестирования программ БПО используется имитатор команд бортового компьютера (ИКБК), создаваемый для каждой вычислительной платформы. Этот имитатор входит в состав системы тестирования и отладки кросс-системы программирования на языке Модула-2 для соответствующего БК и обеспечивает возможность выполнения получаемого для БК исполнимого кода на обычном ПК. Его программный интерфейс не только позволяет выполнять средствами кросс-системы тестирование и отладку отдельных программ БПО в диалоговом и пакетном режиме, но и позволяет осуществлять автоматическую оценку полноты автономного тестирования этих программ, обеспечивая высокое качество этапа автономного тестирования программ БПО [6].

Для этапа системного тестирования ПО систем спутника и БПО спутника в целом на основе ИКБК создаётся полная программная модель БК. Эта модель является ядром программной модели спутника, входящей в состав средств системного тестирования БПО, и также обеспечивает возможность проведения системного тестирования БПО на обычном ПК. В состав модели БК входит ИКБК из соответствующей кросс-системы программирования и модели устройств БК, такие как модель системы прерывания, модель системы времени, модели ОЗУ и ВЗУ, модели контроллеров внешних и внутренних каналов обмена и прочее [7].

Модель БК создается для каждой вычислительной платформы и без изменения используется в программных моделях спутников, создаваемых на основе одной вычислительной платформы.

Полнота модели БК позволяет не только в полном объеме исследовать функционирование БПО при системном тестировании, но и проводить исследование ситуаций, возникающих при функционировании БПО спутников, на заводских испытаниях и в процессе эксплуатации.

ИКБК и программная модель БК не только обеспечивают покомандное выполнение бортовых программ, но позволяют еще при автономном тестировании с высокой точностью оценить реальное время выполнения этих программ на бортовом компьютере, а при системном тестировании позволяют организовать на средствах системного тестирования БПО в модельном времени реальное временное отражение процессов функционирования БПО и аппаратуры спутника.

АО «РЕШЕТНЁВ» обладает эффективной технологией создания программных моделей спутников как для целей системного тестирования БПО, так и для его сопровождения при эксплуатации [8, 9].

Программная модель спутника строится на базе унифицированного общесистемного ядра средств системного тестирования и включает в свой состав программные модели бортового компьютера, модели аппаратуры бортового комплекса управления спутников, модели поведения систем спутника, модель его орбитального движения и реальное БПО. Уровень детальности программного моделирования аппаратуры и поведения систем определяется необходимым уровнем детальности системного тестирования БПО.

Программная модель спутника создается для каждого спутника и сопровождается в течение всего времени его существования, обеспечивая возможность верификации доработок БПО в процессе его сопровождения.

Использование средств программного моделирования в технологии разработки БПО не только существенно сокращает сроки и трудоемкость разработки и сопровождения БПО спутников, но и существенно сокращает сроки и трудоемкость создания имитаторов спутников для Центров управления полетами. Дело в том, что программная модель спутника для системного тестирования БПО после незначительной доработки может использоваться в качестве программной модели космического аппарата для имитатора спутника, необходимой для обеспечения возможности обучения персонала Центров управления и для верификации процедур управления спутником перед их применением.

Внедрение на спутнике бортового компьютера с новой архитектурой требует создания новой вычислительной платформы, сохраняющей традиционные пользовательские и программные интерфейсы БПО и средств разработки БПО.

В 2017 году в АО «РЕШЕТНЁВ» была завершена подготовка средств разработки БПО для внедрения на КА АО «РЕШЕТНЁВ» двух новых компьютеров – С-32М1 (архитектура SPARCv8) и БИВК-М (архитектура PowerPC).

Для каждой вычислительной платформы были созданы:

− унифицированное ядро ПО БКУ КА, включая операционную систему бортового компьютера, создающее типовую среду программного функционирования и программного управления для ПО систем КА;

− средство разработки и автономного тестирования программ БПО – кросс-систему программирования на языке программирования Модула-2 (КСП М2), включая программный имитатор команд бортового компьютера;

− средство системного тестирования ПО систем КА и БПО в целом (НОК БПО), включая программную модель КА (ПМКА), содержащую модель бортового компьютера, модели аппаратуры БКУ КА и модели поведения систем КА.

Работы по созданию средств для двух компьютеров разной архитектуры впервые в истории АО «РЕШЕТНЁВ» проходили практически параллельно. Это обстоятельство заставило для снижения трудоемкости работ провести перепроектирование средств в направлении максимальной унификации их компонент.

В результате таких работ при создании ОС для этих компьютеров в их структуре удалось выделить и минимизировать архитектурно зависимое микроядро, предоставляющее для компонент следующего уровня уже унифицированный архитектурно-независимый программный интерфейс. Найденное решение позволило унифицировать исходные тексты компонентов ОС [10–12].

При создании КСП М2-SPARC и КСП М2-PPC унификация структуры ИКБК позволила не только сократить общий срок и трудоемкость их создания, но и использовать один и тот же ИКБК в КСП М2 и в средствах системного тестирования.

В свою очередь, унификация структуры ПМКА позволила в обеих созданных моделях КА использовать одну и ту же среду программного моделирования.

Заключение

Проведенные мероприятия позволили не только своевременно подготовить технологию разработки БПО к созданию программ для новых КА, но и обеспечили возможность АО «РЕШЕТНЁВ» при создании новых КА в большом объеме использовать имеющийся задел компонент ПО систем КА, процедур тестирования и программной документации БПО КА.

Список литературы

[1] Колташев А.А., Кочура С.Г. Технология создания и сопровождения бортового программного обеспечения спутников связи, навигации и геодезии: современное состояние // Наукоемкие технологии. 2014. № . 9. С. 38–42.
[2] Колташев А.А., Тимисков М.В., Шумаков Н.Н., Барков А.В. Технология создания программных моделей бортовых компьютеров спутников // «Наукоемкие технологии». 2014. № . 9. С. 34–38.
[3] Колташев А.А., Кочура С.Г., Барков А.В. Разработка и сопровождение бортового программного обеспечения спутников АО «ИСС» // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № . 3. С. 122–130.
[4] Колташев А.А. Технология разработки и сопровождения бортового программного обеспечения спутников связи и навигации. Дисс… д-ра техн. наук. Красноярск. СибГАУ. 2010. 307 с.
[5] Колташев А.А. Три «кита» бортового программирования // XXI Международная научная конференция. Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ. 2016. С. 93–95.
[6] Колташев А.А., Краус С.А., Шумаков Н.Н. Использование языка программирования МОДУЛА-2 при создании российских спутников связи и навигации // Решетневские чтения: Материалы XVII Международной научной конференции. 2013. Ч. 2. С. 215–216.
[7] Колташев А.А. Основные принципы системного тестирования и подтверждения бортового программного обеспечения спутников // Вестник СибГАУ. 2010. № . 1(27). С. 4–7.
[8] Колташев А.А., Кочура С.Г., Тимисков М.В., Тололо А.В., Шумаков Н.Н. Программное моделирование в технологии разработки бортового программного обеспечения спутников // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов 15-й Международной научной конференции. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2010. 176 с.
[9] Колташев А.А., Тимисков М.В., Шумаков Н.Н. Технология разработки программных имитаторов бортовых компьютеров спутников // XIX Международная научная конференция. Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ. 2014. 132 с.
[10] Колташев А.А., Котенёв Т.Л, Шумаков Н.Н. Технология переноса бортового программного обеспечения спутников связи, навигации и геодезии на новые вычислительные платформы // XX Международная научная конференция. Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ. 2015. 236 с.
[11] Колташев А.А., Барков А.В., Шумаков Н.Н. Подготовка технологии разработки бортового программного обеспечения КА к использованию новых бортовых компьютеров // XXII Международная научная конференция. Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ. 2017. 228 с.
[12] Колташев А.А., Барков А.В. Бортовое программное обеспечение КА Глонасс – новые вызовы. // XXIV международная научная конференция. Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2019. 204 с.

THE KEY ASPECTS EFFECTIVE TECHNOLOGY OF ONBOARD SOFTWARE DEVELOPMENT FOR COMMUNICATIONS, NAVIGATION AND GEODESY SATELLITES

A.A. Koltashev, S.G. Kochura
JSC «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems»
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

The article summarizes more than forty-year period of progress of technology of development of the onboard software of the satellites created by JSC «Academician M.F. Reshetnev» Information Satellite Systems» (now JSC «RESHETNEV»), and provides an overview of the key aspects that make this technology effective: satellite software is developed as a set of satellite system software, considered as software built into these systems; satellite system software operates in a single hardware and software environment and is developed on single tools using a single technology; the system for supporting design, system testing and software maintenance is built on the basis of the satellite software information model and the system of development object archives; the environment for development, autonomous testing and verification of software

for software systems is built on the basis of a cross-programming system in the Modula-2 language, containing interpreters for on-board computer commands; portability of functional software to a new computing platform is ensured by the constancy of software interfaces and special methods for adapting the unified on-board OS to new computing platforms; quality management, based on the quality of software components, the quality of software configuration management and the quality of software verification and confirmation as a whole; three-level management of objects and works; the use of software models of satellites both for the purposes of system testing of satellite software and for its maintenance during operation.

Keywords: spacecraft, onboard computer, software engineering, satellite software development technology.

Submitted: 09.04.2025. Accepted: 02.07.2025.

References

[1] Koltashev A.A., Kochura S.G. The technology of development and maintenance of onboard software of communications satellites, navigation and geodesy: current status // Science Intensive Technologies journal, 2014, no. 9, pp. 38–42.
[2] Koltashev A.A, Timiskov M.V., Shumakov N.N., Barkov A.V. The technology of creation program models of satellite's onboard computers // Science Intensive Technologies journal, 2014, no. 9, pp. 34–38.
[3] Koltashev A.A., Kochura S.G., Barkov A.V. The development and maintenance onboard software of JSC «ISS» satellites // Kosmonavtika i raketostroenie, 2018, no. 3(102), pp. 122–130.
[4] Koltashev A.A. The technology of development and maintenance of onboard software of communications and navigation satellites. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Krasnoyarsk, SibSAU Publ, 2010, 307 p.
[5] Koltashev A.A. Three "whales" of onboard programming // Siberian Journal of Science and Technology, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 532–539.
[6] Koltashev A.A., Kraus S.A., Shumakov N.N. Modula – 2 programming languages using at creation of the Russian communication and navigation satellites // Reshetnev readings: materials of the XVII International scientific conference, 2013, Part 2, pp. 215–216.
[7] Koltashev A.A. Main principles of communication and navigation satellites onboard software system testing and validation // Vestnik SibSAU, 2010, no. 1(27), pp. 4–7.
[8] Koltashev A.A., Kochura S.G., Timiskov M.V, Tololo A.V., Shumakov N.N. Program modeling in development technology of the on-board software of satellites // XV International Scientific Conference. System analysis, control and navigation: Abstracts. Collection. M .: MAI Publishing House, 2010, 176 p.
[9] Koltashev A.A, Timiskov M.V., Shumakov N.N. Development technology of the software simulators of onboard computers of satellites // XIX International Scientific Conference. System analysis, control and navigation: Abstracts. Collection. M .: MAI Publishing House, 2014, 132 p.
[10] Koltashev A.A., Kotenev T.L., Shumakov N.N. Technology of porting onboard software on new computing platforms for satellites of communications, navigation and geodesy // XX International Scientific Conference. System analysis, control and navigation: Abstracts. Collection. M.: MAI Publishing House, 2015, 236 p.
[11] Koltashev A.A., Barkov A.V., Shumakov N.N. Preparation of the development technology of the onboard spacecraft software towards using new on-board computers // XXII International Scientific Conference. System analysis, control and navigation: Abstracts. Collection. M.: MAI Publishing House, 2017, 228 p.
[12] Koltashev A.A., Barkov A.V. Spacecraft Glonass onboard software – new challenges // XXIV International Scientific Conference. System analysis, control and navigation: Abstracts. Collection. M.: MAI Publishing House, 2019, 204 p.

Сведения об авторах

Колташев Андрей Александрович – доктор технических наук, доцент, эксперт по технологии разработки БПО космических аппаратов АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил Новосибирский государственный университет в 1975 году. Область научных интересов: методы и средства разработки программного обеспечения космических аппаратов.

Кочура Сергей Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального конструктора по электрическому проектированию и системам управления космических аппаратов АО «РЕШЕТНЁВ». Окончил Новосибирский электротехнический институт в 1978 году. Область научных интересов: электрическое проектирование космических аппаратов.