

УДК 629.786.2.05(075.8)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ РАЗГОННЫМИ БЛОКАМИ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Коновалов В.П., к.т.н., **Куцевалов А.Т.**, к.т.н., **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор,
Макатров А.С., к.т.н., **Чаплинский В.С.**, д.т.н., профессор,
НИИ космических систем имени А.А. Максимова» - филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», E-mail: info@niiks.com, Московская обл., Россия

Аннотация. На основе анализа требований к перспективным разгонным блокам сформулированы задачи наземных измерительных комплексов, обеспечивающих контроль их полёта и управление. Изложена система инновационных мероприятий для качественного совершенствования информационно-телеметрического, навигационно-баллистического обеспечения функционирования и управления разгонными блоками.

Ключевые слова: разгонный блок, телеметрия, космическая навигация, управление, спутник-ретранслятор, навигационная аппаратура потребителя, многофункциональная космическая система ретрансляции, инновация.

INNOVATION TECHNOLOGIES AND CONTROL FACILITIES FOR A SPACE LAUNCH VEHICLES BOOSTERS

Konovalev V.P., Ph.D., **Kutsevalov A.T.**, Ph.D. **Makarov M.I.**, Prof., D.ofSci.(Tech) ,
Makatrov A.S., Ph.D., **Chaplinsky V.S.**, Prof., D.ofSci.(Tech).

A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of FSUE Khruichev State Research and Production Space Center, E-mail: info@niiks.com Moscow Region, Russia

Abstract. Based on the boosters requirements analysis the tasks for ground control complex facilities providing the advanced boosters flight control and command had been formulated. Paper expounds the system of innovation measures aimed at qualitative perfecting the information, telemetry, space navigation and trajectory control of space boosters.

Keywords: booster, telemetry, space navigation, control, data relay spacecraft, user navigation equipment, multi-purpose data relay system, innovation.

Современные разгонные блоки (РБ), входящие в состав ракет космического назначения (РКН), предназначены для выведения космических аппаратов (КА) на различные типы околоземных орбит с высотой апогея до десятков тысяч километров, а также на отлётные к Луне и планетам орбиты.

РБ рассчитаны на многократное включение маршевых двигателей (МД) для проведения межорбитальных переходов. Длительность циклограммы полёта РБ составляет от нескольких часов до полусуток и более. РБ оснащаются автономной бортовой системой терминального управления движением.

Наземная инфраструктура для таких «автономных» РБ в настоящее время решает только задачи контроля полёта РБ на основе приёма с борта и обработки телеметриче-

ской (ТМИ) и навигационной информации (НИ) с целью оценки выполнения задачи запуска КА, оценки лётно-технических характеристик РБ, а в случае нештатных ситуаций выявления и анализа их причин.

Анализ работ, проводимых в обоснование разработки новой Федеральной космической программы (до 2025г.) и на дальнейшую перспективу показывает следующее.

Разгонные блоки будут развиваться в направлении повышения энергетических возможностей по выводу на орбиту грузов массой до 10-20 тонн, (в том числе на высокоэнергетические орбиты), будет создана «флотилия» межорбитальных буксиров, по существу РБ, для доставки грузов и топлива как в околоземной зоне (до геостационарных орбит), так и в окололунном пространстве, с проведением стыковок с обслуживаемыми объектами. Длительность функционирования РБ на орбитах будет составлять от нескольких часов до нескольких суток, а для РБ с электрореактивными двигателями малой тяги и для межорбитальных буксиров может достигать до нескольких месяцев. Это потребует уточнения и корректировки программы полёта.

Таким образом, перспективные РБ представляются как управляемые объекты.

Система управления РБ, представляет собой совокупность бортовых измерительных комплексов (БИК) и наземных комплексов управления (НКУ) - средств измерения, передачи, обработки информации и управления, с привлечением необходимой космической инфраструктуры (космические системы навигации, связи, ретрансляции) /1, 2/.

Для перспективных управляемых РБ нового поколения дополнительно к подсистемам информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) и навигационно-баллистического обеспечения (НБО) необходимо также рассматривать подсистему управления РБ.

Перспективная система управления РБ (ПСУ РБ) должна иметь возможности:

- телеметрический контроль функционирования работы РБ в режиме реального времени от момента запуска РКН до отделения выводимого КА от РБ на всех участках траектории независимо от наклона орбиты, высоты полёта РБ, ориентации и манёвров в пространстве;

- навигационно-баллистическое обеспечение (НБО) и управление движением с требуемой точностью на всех участках выведения РБ и при необходимости коррекция траектории по данным, полученным НКУ;

- анализ и прогнозирование выполнения программы в процессе полёта, принятие оптимальных решений по выходу из нештатных ситуаций (НШС) на борту РБ и в наземных комплексах.

В ПСУ РБ функции управления должны быть оптимальным образом распределены между бортовым и наземным комплексом управления (между БКУ и НКУ).

Система управления должна быть на порядок надёжнее управляемого объекта, отказы в отдельных средствах и каналах контроля и управления не должны ухудшать эффективность управления, а точность навигационно-баллистического обеспечения должна в несколько раз быть лучше допустимых отклонений от траектории движения.

Достижение необходимых характеристик ПСУ не может быть обеспечено традиционным экстенсивным (эволюционным) путём: увеличением количества наземных измерительных средств, средств передачи и обработки данных, улучшением отдельных их характеристик и т.п. Необходимо переходить на инновационный путь качественного и комплексного преобразования бортовых и наземных средств контроля и управления. При этом под инновациями понимаются новые средства, новые технологии, новые методы управления и т.д., качественно улучшающие характеристики и возможности рассматриваемых систем и процессов, сокращающие общие расходы на их создание и применение в длительной перспективе.

Поскольку система контроля и управления РБ относится к сложным системам, состоящим из ряда подсистем и большого количества бортовых и наземных средств, взаимодействующих с различными элементами космической и наземной инфраструктуры, ниже рассматривается система инновационных мероприятий по развитию трёх основных подсистем: информационно-телеметрического обеспечения перспективных РБ, навигационно-баллистического обеспечения и подсистемы управления полётом РБ в части структуры, технологии и функциональных возможностей.

Информационно-телеметрическое обеспечение (ИТО) РБ

Характеристика существующего комплекса ИТО:

- наземные приёмно-регистрирующие станции (НПРС) для приёма ТМИ расположены на территории РФ образует многопунктный комплекс, состоящий из множества измерительных пунктов (ИП) и содержащий несколько десятков станций;
- вне зон радиовидимости (ЗРВ) ТМИ запоминается на борту РБ и в режиме воспроизведения передаётся на НПРС при входе в ЗРВ ИП;
- используются частоты диапазона Д2 и Д1;
- антенные системы НПРС с эффективной поверхностью $S_{эф}$ – 6; 20; 60 кв.м без малошумящих усилителей (МШУ) и с МШУ;
- скорости передачи ТМИ с РБ $V=8-256$ кбит/с;
- мощность передатчика бортовой радиотелеметрической системы (БРТС) до 20 Вт;
- коэффициент усиления бортовой антенной системы от 0,05 до 1;

- вероятность ошибки ТМИ на бит информации $P_{\text{ош}}=10^{-3}-10^{-4}$.

Основными ограничениями существующего ИТО является наличие ненаблюдаемых участков траектории полёта РБ при высотах до нескольких тысяч километров, глобальность контроля на этих высотах не превышает 40%. Из-за отсутствия ЗРВ задержки в приёме ТМИ могут достигать до 2 часов. Для гарантированного приёма ТМИ при высотах полёта РБ на стационарных орбитах скорость передачи ТМИ необходимо снизить до 32 кбит/с, на суперсинхронных орбитах (с высотой 60-80 тыс.км) до 8 кбит/с, а на окололунных орбитах до 1 кбит/с и менее.

В таблице 1 приведены поэтапные инновационные мероприятия по развитию ИТО, которые должны устранить имеющиеся ограничения и существенно улучшить характеристики ИТО РБ.

Инновационные мероприятия по развитию ИТО РБ Таблица 1.

№ п/п	Инновационные мероприятия		
	Содержание мероприятий	Особенности и возможности	Ожидаемые характеристики ИТО
1.	Ретрансляция ТМИ через спутник-ретранслятор (СР) «Луч-5» в S-диапазоне частот в канале РБ-СР через малонаправленные антенны; помехоустойчивое кодирование; индивидуальный доступ к СР	Антенны РБ на СР не ориентируются; программное наведение антенны СР (Ø=4м); передача ТМИ по каналу СР- командно-измерительная система «Клён-Р» - центр управления ретрансляцией и связью – центр управления полётом РБ. Обслуживание полёта РБ через СР до высот не более 2-3 тыс.км.	V до 32 кбит/с через СР $P_{\text{ош}}=10^{-4}$; передача ТМИ в канале РБ – СР в реальном времени на участке доразгона, опорной орбите, втором включении МД; время задержки ТМИ в канале СР – «Клён-Р» - ЕЦУП до 10 мин
2.	Ретрансляция ТМИ через СР в S- или Ku-диапазонах; взаимное наведение антенн СР и РБ; на РБ радиомаяк; более эффективные бортовые антенны.	Модернизированный СР «Луч» с высотой обслуживания объектов до 5-10 тыс.км.	$V=(32...256)$ кбит/с; приём ТМИ через СР с промежуточной и части переходной орбиты в реальном времени; $P_{\text{ош}}\leq 10^{-6}$.
3.	Новое поколение МКСР, бортовые антенны СР Ø10-16 м, реализация канала Земля – СР – РБ; радиолинии СР – СР.	Получения информации с РБ через СР во всей области до ГСО; сеансная передача ТМИ, обработка ТМИ на борту, вызов НКУ при НШС.	$V>1$ МГбит/с; управление режимами передачи ТМИ; возможность выдачи команд управления РБ; задержка ТМИ в канале ретрансляции менее 1 мин.
4.	Использование в радиолиниях X-диапазона частот, эффективных наземных антенн с низкой шумовой температурой, сокращение избыточности ТМИ.	Привлечение средств НКУ дальнего космоса; возможность комплексирования (совмещения) радиолиний НКУ РБ и выводимого КА	Расширение зоны обслуживания РБ до окололунных орбит при обеспечении необходимой информативности ТМИ.

Выполнение первого этапа (п.1.1) возможно уже в настоящее время с использованием многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР), три спутника-ретранслятора (СР) «Луч-5» системы уже находятся на геостационарной орбите. Для

выполнения этого мероприятия требуется только дооснастить РБ абонентской аппаратурой ретрансляции (ААР) для передачи ТМИ с РБ. Реализация этого мероприятия обеспечит глобальный контроль РБ до высот 2-3 тыс.км. Данное ограничение объясняется возможностью перенацеливания бортовой параболической антенны диаметром 4 м на СР «Луч-5» только в пределах 22 градусов.

Реализация мероприятий 1.2 и 1.3 требует соответственно доработки и создания нового поколения МКСР, а также введения в бортовой измерительный комплекс РБ более эффективных антенн. При этом во всей околоземной зоне до геостационарных орбит телеметрический контроль РБ будет обеспечиваться в реальном времени с требуемой информативностью и помехоустойчивостью.

Мероприятие 1.4 связано с необходимостью увеличения дальности телеметрического контроля РБ до окололунных орбит и заключается в увеличении информативности радиолиний при использовании более высоких диапазонов частот (X-диапазон, в перспективе КА-диапазон и оптический диапазон), больших наземных антенн с низкой шумовой температурой. Аналоги этих технологий используются при управлении КА дальнего космоса.

Навигационно-баллистическое обеспечение (НБО) РБ

Характеристика существующего НБО РБ:

- до высот порядка 4...5 тыс.км (до выхода из зоны «сплошного» радионавигационного поля космических навигационных систем (КНС) ГЛОНАСС/GPS) контроль параметров движения РБ осуществляется по данным бортовой навигационной аппаратуры потребителя (НАП);

- навигационные вектора НАП передаются в составе телеметрии вместе с данными бортовой инерциальной системы управления движением (СУД) в ЗРВ измерительных пунктов;

- при дальностях до РБ в диапазоне от 2000 до 110000 км используется траекторная информация, полученная в групповых сеансах измерений командно-измерительными системами (2-3 КИС);

- предельные погрешности измерений текущих навигационных параметров комплекса КИС могут составлять по дальности до 150 м, по скорости до 1 см/с;

- дополнительно привлекаются угломерные средства - корреляционно-фазовый пеленгатор (КФП) «Ритм» и астро-оптические средства измерений;

- вся обработка информации проводится в баллистических центрах (БЦ) на Земле;

- СУД не корректируется внешней информацией.

Основными ограничениями являются задержка получения информации, как и в случае с приёмом ТМИ, невозможность получения векторов НАП в дискретном поле КНС ГЛОНАСС/GPS, неустойчивая работа НАП при возвращении РБ из дискретного поля в сплошное навигационное поле, имеются траектории выведения, не позволяющие сформировать качественную измерительную схему (2-3 КИС восточной и западной группировки), для обеспечения требуемой точности определения параметров орбит выведения КА, использование КИС ограничено дальностью порядка 110000 км.

В таблице 2 приведён ряд поэтапных инновационных мероприятий по развитию НБО, которые должны устранить указанные ограничения и улучшить характеристики НБО.

Инновационные мероприятия по развитию НБО Таблица 2.

№ п/п	Инновационные мероприятия		
	Наименование мероприятий	Особенности и возможности	Ожидаемые характеристики НБО
2.1	Ретрансляция информации НАП в составе ТМИ через СР «Луч-5».	Ограничение по высоте полёта до 2-3 тыс.км, передача измерений в реальном времени из ненаблюдаемых НКУ участков траектории	Сокращение времени доставки информации НАП в БЦ от десятков до нескольких минут.
2.2.	Передача в НКУ первичных измерений НАП (ПИ) в дополнение к навигационным векторам.	Необходимость доработки бортовой аппаратуры и специального математического обеспечения (СМО) БЦ. Возможность навигации в дискретном навигационном поле.	Повышается точность навигационных определений в 1,3-1,5 раза. Групповая обработка расширяет зону работы АСН до 11-12 тыс.км. При накоплении ПИ на интервале 1,5-2 часа могут определяться параметры переходных и целевых орбит.
2.3	Комплексирование данных СУД и информации НАП (АСН) КНС ГЛОНАСС/GPS.	Необходимость автоматического устранения аномальных ошибок НАП (АСН) на борту РБ; необходимость накопления данных НАП в дискретном поле.	Повышение точности управления движением центра масс РБ при выводе КА на целевую орбиту.
2.4	Создание дополнительных высокоточных управляемых источников информации для НАП (АСН) в локальных зонах по траектории движения РБ: Использование СР «Луч» как источников навигационной информации с точными эфемеридами.	Необходимость развёртывания на Земле 3-4 «псевдонавигационных спутников» с управляемыми диаграммами направленности антенн; Доработка СР МКСР для возможности формирования навигационных сигналов.	Высокоточное навигационное обеспечение с использованием АСН до ГСО и выше.
2.5	Привлечение наземных радиотехнических комплексов (НРТК) из состава НКУ дальнего космоса («Фобос», «Спектр-Х»).	Среднеквадратические ошибки измерения дальности – 0,3 м, скорости – 0,3 мм/с.	Возможность траекторных измерений на удалениях до 400 тыс.км и более.
2.6	Корректировка траектории выведения РБ по результатам навигационно-баллистических расчётов в центре управления.	Оперативная оценка параметров орбиты РБ после импульсов включения МД, сравнение с номинальными, выработка (при	Повышение точности и надёжности выведения КА на целевые орбиты за счёт уменьшения

		необходимости) уставок по коррекции следующего импульса, выдача данных на борт РБ с проверкой достоверности.	ошибок бортовой СУД.
--	--	--	----------------------

Мероприятия 2.1 реализуются одновременно с инновационным мероприятием 1.1 (таблица 1) по ИТО и обеспечивает глобальность навигационных измерений на низких участках полёта РБ.

Инновационное мероприятие 2.2 предполагает передачу в составе ТМИ не только навигационных векторов, но и первичных измерений НАП по совокупности навигационных КА. При этом повышается достоверность навигационных определений, а зона применения НАП по высоте полёта РБ значительно расширяется.

Особенно актуальным в настоящее время является мероприятие по пункту 2.3, повышающее точность бортовой инерциальной СУД за счёт учёта высокоточных измерений НАП и отбраковки её аномальных измерений. Комбинация СУД и НАП образуют на борту РБ высокоточную автономную систему навигации (САН), которая становится основой для управления РБ в полёте.

Инновационные мероприятия 2.4, 2.5 и 2.6 позволят обеспечить высокоточное и управляемое НБО не только в околоземной области до высот порядка 40 тыс.км, но и на дальностях до Луны и в точках либрации.

Подсистема управления полётом перспективных РБ

Существующее положение: управление функционированием бортовых систем и движением РБ осуществляется автономной бортовой системой управления (БСУ) по заранее заложенной временной программе (ВП), надёжность БСУ обеспечивается резервированием её элементов; ВП и ошибки инерциальной СУД в полёте с Земли не корректируются; не предусмотрено устранение нештатных ситуаций на борту РБ, при возникновении аварии по команде БСУ включаются режимы передачи ТМИ, предшествующие аварии. В таблице 3 приведён обобщённый состав инновационных мероприятий по развитию бортовых и наземных измерительных комплексов и превращению их в совокупности в высокоэффективную автоматизированную систему управления (АСУ) РБ. Реализация приведённых в таблице 3 инновационных мероприятий возможна при разработке нового поколения РБ в период 2020...2030 гг.

Анализ таблиц № 1, 2, 3 показывает, что большинство инновационных мероприятий не являются изолированными, а связаны друг с другом, их реализация требует системного подхода к созданию и применению по согласованным этапам и срокам создания ПСУ, а также по привлекаемым средствам космической инфраструктуры: МКСР, системы связи, навигации, комплексами управления КА.

Таблица 3.

Инновационные мероприятия по управлению полётом перспективных РБ

Инновационные мероприятия		
Наименование мероприятий	Особенности и возможности	Ожидаемые характеристики
Реализация на РБ канала приёма команд (программ) управления, передаваемых через СР МКСР и (или) через КИС.	Включение в состав БИК приёмника сигналов и дешифратора команд для передачи в БКУ. Доработка борта - дополнительная масса несколько кг.	Коррекция режимов работы бортовых систем, траектории движения центра масс и ориентации РБ.
Интеллектуализация СУ РБ: - разработка в ЦУП комплексной математической и физической модели функционирования РБ, сравнение с результатами контроля по данным ТМИ и НБО, принятие решений по корректировке управления с применением экспертной системы (ЭС); - внедрение ЭС в бортовое математическое обеспечение.	Необходимость приёма и обработки измерительной информации практически в реальном времени, задержки принятия решений должны быть в диапазоне от нескольких минут до получаса. Сложность разработки бортового СМО, обеспечивающего адекватность оцениваемых ситуаций и исключение аномальных решений.	Возможность снижения вероятности возникновения НШС, управление выходом из НШС. Выход из НШС в непредусмотренных ситуациях и формирование сигнала «вызов НКУ» в непредусмотренных ситуациях
Повышение уровня автоматизации, быстродействия и надёжности аппаратно-программных комплексов обработки и телекоммуникации.	Уменьшение времени задержки в передаче информации до единиц секунд, снижение вероятности сбоя и ошибок до $10^{-8} \dots 10^{-10}$. Требуется новое поколение средств автоматизации с отечественным защищённым математическим обеспечением.	ПСУ РБ становится высокоэффективной АСУ РБ. Существенно сокращается обслуживающий персонал, количество средств и наземных пунктов.

Нарушение системного подхода при реализации инновационных проектов приводит к существенным издержкам по эффективности применения, затягиванию сроков и экономическим потерям. Это можно проиллюстрировать на примере разработки многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) «Луч».

Реальные сроки разработки и запуска СР «Луч-5» оказались не согласованы со сроками готовности абонентов, абонентская аппаратура ретрансляции (ААР) с необходимыми характеристиками своевременно не разработана, а ТТХ МКСР в определённой мере отличаются от первоначальных требований, изложенных в проекте ТТЗ и эскизном проекте /3, 4/. В результате на геостационарных орбитах развёрнуты три СР «Луч-5», но пока нет ни одного космического абонента МКСР, даже по пилотируемой программе, в интересах которой уже много лет арендуется американская космическая система ретрансляции «TDRSS».

Принципы системного подхода должны применяться ко всем инновационным предложениям, представленным в таблицах № 1...3, связанным с разработкой иннова-

ционных проектов нового поколения РБ, транспортно-технического обеспечения системы выведения перспективных космических объектов и систем управления по программам дальнейшего освоения космического пространства, включая лунную программу и программы дальнего космоса.

Кажущаяся сложность и затраты на инновационное развитие и достижение нового качества системы управления РБ компенсируются тем, что выводимые в космос целевые объекты и реализация с их помощью программы космических исследований на порядок и более превышают стоимость контроля и управления РБ. Кроме того, реализация предлагаемых мероприятий поднимет на качественно новую ступень всю космическую инфраструктуру и обеспечит приоритет отечественной космонавтики.

Список литературы

1. Макатров А.С., Герастовский В.Ф., Коновалов В.П., Чаплинский В.С., Куцевалов А.Т. Технология глобального информационного обеспечения функционирования ракетно-космической техники // Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии. Научные труды Научно-исследовательского института космических систем имени А.А. Максимова. Том 1,- М.-НИИ КС им. А.А. Максимова, 2012 – с.149-176.
2. Макаров М.И., Макатров А.С., Богданов С.А., Куцевалов А.Т., Коновалов В.П. Информационно-телеметрическое обеспечение разгонных блоков в первой половине XXI века. Научные труды Научно-исследовательского института космических систем имени А.А. Максимова. Том 1,- М.-НИИ КС им. А.А. Максимова, 2012 – с.177-191.
3. Многофункциональная космическая система ретрансляции. Эскизный проект.- М.: НПО ПМ, 2001.
4. Разработка предложений по программе и методологии перевода изделий и объектов РКТ на информационное обслуживание с использованием перспективной отечественной КСР. Итоговый научно-технический отчет по НИР «Вереск-2», по этапу 4 Госконтракта № 047-0912/02 от 20.03.2002, РАКЦ.