

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 621.3 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.3.3.10

**Ключевые навигационно-баллистические технологии,
повышающие эффективность управления КА**

А. Е. Тюлин, д. э. н., к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Бетанов, д. т. н., профессор, betanov.vv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье исследуются вопросы создания перспективных космических технологий, их общие характеристики и особенности. Обосновываются основные принципы создания и применения ключевых навигационно-баллистических технологий, позволяющих обеспечить эффективное управление космическими аппаратами. Предложен вариант классификации исследуемых технологий на основе наиболее часто применяемых в рассматриваемой области признаков. Анализируются два ленточных графика типового технологического цикла навигационно-баллистического обеспечения с возможностью обработки совместной выборки измерений текущих навигационных параметров и рекуррентных алгоритмов обработки калмановского типа.

Приведен вариант общей классификации технологий, позволяющий выявить и соотнести между собой различные типы и классы технологий, что способствует (особенно на ранних этапах) повышению эффективности их разработки.

Ключевые слова: космический аппарат, математическая модель движения, баллистический коэффициент, вектор состояния, навигационно-баллистическое обеспечение

**Key Navigation-Ballistic Technologies
for Improving the Efficiency of Spacecraft Control**

A. E. Tyulin, Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

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

V. V. Betanov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., betanov.vv@spacecorp.ru

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

Abstract. The article focuses on the issues of creating promising space technologies, their general characteristics, and special features. The basic principles for creating and implementing key navigation-ballistic technologies, which help ensure efficient control of spacecraft, are substantiated. A classification of the technologies is proposed based on the characteristics most often used in the area under consideration. Two bar charts of a typical technological cycle of navigation-ballistic support with the possibility of processing a joint sample of measurements of current navigation parameters and recurrent Kalman processing algorithms are analyzed.

A variant of a general classification of technologies that allows singling out and correlating different types and classes of technologies is given. This contributes (especially at the early stages) to the improvement of the efficiency of their development.

Keywords: spacecraft, mathematical model of motion, ballistic coefficient, state vector, navigation-ballistic support

Понятие «технология» в первую очередь ассоциируется с областью технических знаний, но в то же время затрагивает и науку с ее подходами и методами, и экономику, и политику, и многие другие сферы деятельности человека.

Технология (от др.-греч. *τεχνη* — искусство, мастерство, умение; *λόγος* — «слово», «мысль», «смысл», «понятие») — совокупность методов и инструментов для достижения желаемого результата; в широком смысле — применение научного знания для решения практических задач. Технология включает в себя способы работы, ее режим и последовательность действий.

Для разработки и реализации новых технологий важен тщательный анализ основных **принципов их создания и применения**, а именно: **системности, комплексности, оптимальности (чаще рациональности), устойчивости, перспективности и оперативности** (рис. 1).



Рис. 1. Основные принципы планирования испытаний

Создание ключевых технологий (включая навигационно-баллистические) является одной из главных функций целевой разработки современных перспективных систем и комплексов, в том числе для реализации крупных космических программ страны. Поэтому разработка космических технологий должна вестись в соответствии с принципом **системности**.

Системный подход к созданию и эксплуатации технологий требует проведения системного анализа всего процесса (или его существенной части) их разработки. Для чего сначала необходимо выявить, уточнить и уяснить цели и задачи, которые необходимо достичь и решить в процессе создания рас-

сматриваемого объекта. Затем необходимо разработать комплекс мероприятий, правила выбора способов действий, направленных на достижение целей и решение поставленных задач. При этом должно предусматриваться рассмотрение вопросов, связанных с распределением и использованием материальных, временных, финансовых и людских ресурсов на создание и эксплуатацию конкретных технологий или их элементов.

К числу важнейших принципов разработки современных технологий можно также отнести принцип **комплексности**, реализация которого обеспечивает разработку комплексных планов проведения и технико-экономического обеспечения их исследования, моделирования на начальном этапе, разработки, испытаний, их согласование с общими планами создания технической системы.

В основу планирования создания любого организационно-технического мероприятия, как правило, закладывается принцип **оптимальности** (при определенных обстоятельствах — **рациональности**). Применительно к созданию технологий это означает выбор показателей и критериев эффективности разработки и использования создаваемой технологии и в соответствии с этим поиск инструмента создания его с учетом конкретных целей, условий, ограничений, применяемых методик и априорных сведений об объекте разработки. Оптимизация разработки новых и (или) применения уже (известных) используемых технологий в сочетании с выполнением требований нормативно-технической документации, регламентирующей порядок разработки, способствует обеспечению единства создаваемых объектов.

Одним из важнейших рассматриваемых принципов служит элемент **устойчивости**, так как разрабатываемая технология, как правило, применяется в конкретных пределах области использования. Вместе с тем отклонения параметров входных параметров «заготовки» в известных пределах не должны приводить к катастрофическим результатам на выходе процесса создания и (или) использования.

Применяемые технологии должны быть и **перспективными** и **оперативными**. Перспективные технологии позволяют реализовать преимущества системного подхода к созданию систем и комплексов путем наилучшей увязки всего многообразия

технологических операций с главными целями создания объекта. К числу важнейших задач перспективной разработки технологий относится разработка комплексных элементов проведения, технико-экономического обеспечения и финансирования разработки, их согласование с общими планами создания системы. Оперативность технологий должно обеспечить не только временную составляющую процесса разработки и их применения, но также и конкре-

тизацию и детализацию перспективного использования и его уточнение на основе анализа хода испытаний и предварительной эксплуатации.

Вариант общей классификации технологий представлен на рис. 2.

На разных этапах управления космическим полетом задачи навигационно-баллистического обеспечения (НБО) разнятся [1]. На этапе оперативного управления полетом осуществляются все виды



Рис. 2. Признаки и вариант классификации технологий

работ, связанные с приемом и обработкой поступающей измерительной информации о движении центра масс космического аппарата, решением баллистических задач, анализом результатов их решения и выдачей персоналу группы управления данных, необходимых для управления полетом.

Под системой оперативного навигационно-баллистического обеспечения (ОНБО), как правило, понимают комплекс организационных, программно-математических, информационных, технических и других средств, функционирующих под единым управлением с целью получения в течение заданного времени и с требуемой точностью совокупности выходных баллистических данных, необходимых для управления определенным множеством космических средств различного целевого назначения.

Требования, предъявляемые к эффективности системы ОНБО, включают следующие положения.

- Система ОНБО должна обладать свойством универсальности, так как ее функционирование направлено на осуществление комплекса работ по обеспечению управления космическими аппаратами различного целевого назначения.

- Все баллистические расчеты, анализ получаемых результатов и выработка рекомендаций относительно принятия решений должны выполняться в сроки, регламентируемые планом управления полетом.

- Средства решения навигационно-баллистических задач должны обеспечивать требуемую точность, оперативность и надежность расчетов как в штатных, так и в нештатных ситуациях в управлении космическими аппаратами.

Исследования в области прикладной теории ОНБО, а также тенденции развития космических технологий и расширение диапазона задач показывают, что возможно повышение эффективности ОНБО управления космическим аппаратом на базе системно-технологического подхода (СТП) [3,5].

Согласно системно-технологическому подходу в диалектической взаимосвязи макрофункции (технологии) и структуры системы, первичной является технология, а структура строится таким образом, чтобы обеспечить наибольшую эффективность технологического процесса ОНБО.

Концепция реализации СТП при синтезе системы ОНБО базируется на создании в качестве

одного из компонентов системы функционального ядра (содержательного наполнения), обладающего свойством гибкости и универсальности на множестве обслуживаемых космических аппаратов. Ядро представляет собой совокупность подсистем, реализующих методы, модели и алгоритмы, а также программы для решения всего комплекса задач ОНБО управления КА, способные адаптироваться к изменению условий их функционирования.

Системообразующие компоненты функционального ядра автоматизированной системы ОНБО — структурные свойства, методы и алгоритмы подсистемы математической модели движения (ММД) и подсистемы определения параметров движения (ОПД) космического аппарата по результатам измерений текущих навигационных параметров (ИТНП).

В практике управления КА как новой сферы деятельности могут возникнуть нештатные ситуации, которые необходимо максимально парировать для успешного выполнения задач полета. Виды нештатных ситуаций и необходимость определения параметров движения космического аппарата для нештатных технологических циклов НБО включают следующие.

1. Ограниченный объем выборки измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) при оперативном определении параметров движения КА, обусловленный срывом штатной схемы реализации циклограммы проведения радиоконтроля орбиты (РКО), в частности:

- выход из строя измерительных средств, запланированных для проведения штатной схемы РКО;
- неполадки на борту КА, которые не позволили провести сеанс связи, включающий проведение РКО;
- определение координат точки падения КА по ИТНП в случае ошибок при выведении на орбиту или при сходе с орбиты;
- геофизические факторы и атмосферные явления, влияющие на возможность проведения сеансов РКО с использованием квантово-оптических средств;
- террористические атаки, которые могут привести к срыву сеансов РКО.

2. Ограниченный объем выборки ИТНП при реализации штатной схемы РКО, обусловленный

наличием не пригодных для определения параметров движения сеансов ИТНП, а именно:

- искажения при передаче сеансов РКО с измерительной станции в центр сбора ИТНП;
- влияние радиотехнических и геофизических помех;
- отклонение технологических параметров измерительных средств от номинала (бортовые фазовые задержки, калибровочные дальности и пр.);
- радиоэлектронное противодействие.

3. Несоответствие расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному. Значение начального вектора состояния \mathbf{a}_0 не обеспечивает требуемые результаты с использованием штатных процедур определения параметров движения КА по ИТНП. Возможные причины:

- выведение КА на орбиту с помощью ракеты-носителя с отклонением параметров орбиты от номинальных;
- отклонение параметров орбиты от номинальных при проведении динамических операций, связанных с коррекцией орбиты КА;
- ошибки прогнозирования движения КА, обусловленные неадекватностью математической модели движения.

Особую значимость проблема определения вектора состояния в нештатных технологических циклах НБО приобретает в условиях динамики геополитической обстановки и вследствие влияния экономических факторов на развитие инфраструктуры командно-измерительного комплекса. Важное значение приобретает решение данной проблемы также при обеспечении функционирования космических объектов с использованием подвижных *командно-измерительных систем* (КИС).

Неполная реализация штатной схемы РКО приводит к необходимости определения параметров движения космических аппаратов по выборкам ИТНП малого объема.

Другой проблемой при оперативном определении вектора состояния космического аппарата в условиях выборки ИТНП ограниченного объема является присутствие априорной неопределенности

вероятностной структуры исходных данных в процедуре статистической обработки измерений. Использование гипотезы о нормальном законе распределения погрешности ИТНП теоретически обосновывается центральной предельной теоремой. Наличие значительных по величине погрешностей ИТНП приводит к тому, что погрешность определения вектора состояния КА выходит за допустимые границы. Опасность таких ситуаций заключается в том, что иногда сложно сделать вывод о причинах значительных отклонений уточненных параметров движения от прогнозируемых. Если отклонения не вызваны ошибкой прогнозирования, то причиной является влияние погрешности ИТНП.

Начальное смещение компонент вектора состояния может привести к значительным погрешностям в прогнозируемых параметрах орбиты. Это может сказаться на качестве выходных данных технологического цикла ОНБО, необходимых для применения КА по целевому назначению. Оперативное навигационно-баллистическое обеспечение предъявляет высокие требования к достоверности ИТНП с точки зрения отсутствия измерений со значительной погрешностью (аномальных ИТНП). В применяемых комплексах программ ОНБО в определенных ситуациях анализ выборки ИТНП, идентификация и исключение аномальных измерений возлагаются на оператора и искусственные интеллектуальные системы. При этом указанные действия производятся, как правило, в интерактивном режиме. Субъективный подход оператора и недостаточно квалифицированное решение об исключении измерений из выборки обработки могут ухудшить точностные характеристики вектора состояния при решении задачи. В связи с этим необходимы методики и алгоритмы, позволяющие на основе статистического анализа выборки ИТНП выполнять необходимые технологические процедуры в автоматическом режиме.

Определение параметров движения во нештатных ситуациях, как правило, характеризуется нарушением условий регулярности задачи определения вектора состояния космического аппарата по ИТНП [2–4]. В вычислительном отношении это проявляется в расходимости итерационных процедур в составе алгоритмов определения параметров движения космического аппарата, в повышенной

чувствительности получаемого решения к погрешностям в исходных данных и, как следствие, в получении значений параметров орбиты со значительными искажениями, а иногда и противоречащих физическому смыслу решаемой задачи [3, 4].

Согласно закону системности общей теории систем объединение «задача НБО — инструмент решения (АС НБО)» (ЗИ), как и всякий другой объект, есть объект-система.

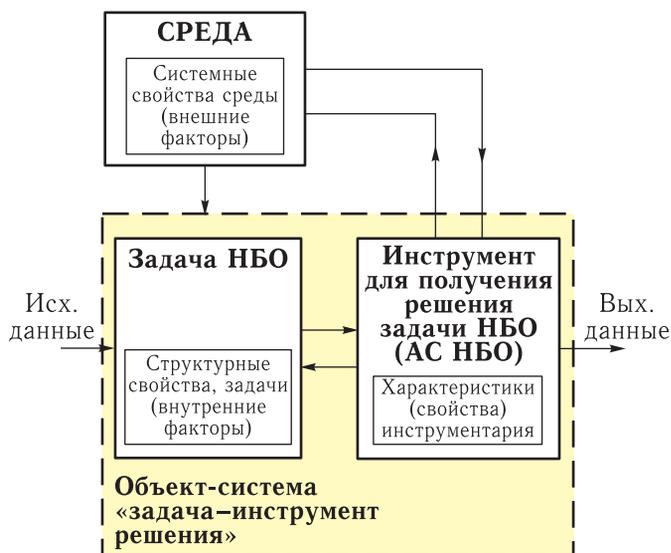


Рис. 3. Объект-система задач НБО с внешней «инфраструктурой»

При этом объект-система ЗИ НБО (рис. 3) рассматривается как целенаправленная иерархическая большая интегрированная система, представляющая собой совокупность иерархически зависимых сложных подсистем, обладающих определенной степенью организованности и автономности и содержащих людей-операторов и пространственно разнесенные комплексы средств автоматизации выполнения функций управления, объединенных, исходя из действующей иерархии целей, с помощью энергетических, вещественных и информационных связей в единую многоконтурную систему «человек-машина» для повышения эффективности процессов НБО.

С совершенствованием инструмента решения задач НБО **появляется возможность решать усложняющиеся задачи** определения параметров движения, осуществлять стандартизацию и уни-

фикацию, производить идентификацию и адаптацию. Вместе с тем усложнение инструментария, требующее «человекомашинной» реализации методов, моделей и алгоритмов навигационно-баллистических задач (НБЗ) в виде программных средств на комплексах средств автоматизации с соответствующими видами обеспечения, **создает, как правило, и дополнительные трудности их решения.**

Указанное противоречие может быть частично разрешено рассмотрением связи «**ЗАДАЧА-ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ**» как **ОБЪЕКТ-СИСТЕМЫ.**

Формализация функционирования системы управления НБО управления КА предполагает [1, 3] необходимость введения в рассмотрение по аналогии с технологическим управлением (ТУ) понятий технологической операции (ТО), технологического цикла (ТЦ) и технологического процесса (ТП), под которыми понимается:

– ТО — суть действий, выполняемых над массивами данных, принадлежащих одному КА, по подготовке информационно-расчетных данных (НБО) для принятия и реализации решения на управление. По существу, это операции по подготовке, решению навигационно-баллистических задач и контролю результатов решения, то есть технологическую операцию ассоциируют с решением конкретной баллистической задачи. Вводится также понятие вспомогательной операции (ВО), под которой понимается операция, не относящаяся к технологической (получение, буферизация и выдача данных, отображение результатов расчетов и др.);

– ТЦ — целенаправленная упорядоченная совокупность ТО, каждая из которых связана определенным отношением по крайней мере еще с одной технологической операцией;

– ТП — совокупность, как правило, взаимосвязанных ТО, ВО и ТЦ, проводимых в течение определенного интервала времени. Технологический процесс управления НБО является композицией ТЦ, ТО и ВО с определяемыми на них отношениями.

К ТЦ предъявляются жесткие требования по точности решения навигационно-баллистических задач (НБЗ) и оперативности получения результатов как отдельных задач, так и выполнения ТЦ

в целом. Обычно ТЦ принято подразделять на оперативную и неоперативную части.

Выполняемые работы по НБО управления оди-ночным аппаратом или некоторой совокупностью КА в течение заданного опорного промежутка време-ни (например, в течение суток) объединяются в оперативный (в частности, суточный) план.

Тогда процесс, состоящий из множества ТЦ, технологических и вспомогательных операций (ВО) и обеспечивающий выполнение оперативного плана, будем называть технологическим процессом НБО. Если известно множество ТО $\{TO_1\}$ и определено понятие отношения r_{ij} между i -й и j -й операциями, то ТЦ может быть представлен в виде кортежа

$$ТЦ = \langle \{TO_1\}, r_{ij} \rangle. \quad (1)$$

По определению технологический процесс (ТП) управления НБО является композицией ТЦ, ТО и ВО с определяемыми на них отношениями:

$$ТП = \langle \{TO_1\}, \{ТЦ_k\}, \{ВО_m\}; r_n \rangle, \quad (2)$$

где r_n — коэффициент, характеризующий отноше-ния между объектами ТО, ТЦ и ВО.

В основу построения системы управления (СУ) НБО, как правило, предъявляются три основных принципа: **автоматизации, интеллектуализации и гибкости** [2]. Реализация первых двух принци-пов связана с созданием СУ, сводящей к миниму-му участие оператора в управлении ходом выпол-нения ТЦ в штатной ситуации. Так как управление ТЦ НБО невозможно осуществлять традиционны-ми методами и приемами, при построении такой си-стемы должны быть использованы положения тео-рии ситуационного управления, применяемой для автоматизации интеллектуальных функций управ-ления сложными системами организационно-дис-петчерского типа.

Для более детального изучения технологи-ческих элементов навигационно-баллистического обеспечения обычно подробно рассматриваются ленточные графики типовых технологических цик-лов НБО управления КА, представленных на рис. 4 и рис. 5 [2, 4, 5]. Технологические цик-лы НБО, ленточные графики которых изображены на отмеченных рисунках, принципиально отлича-ются. При проведении технологических операций,

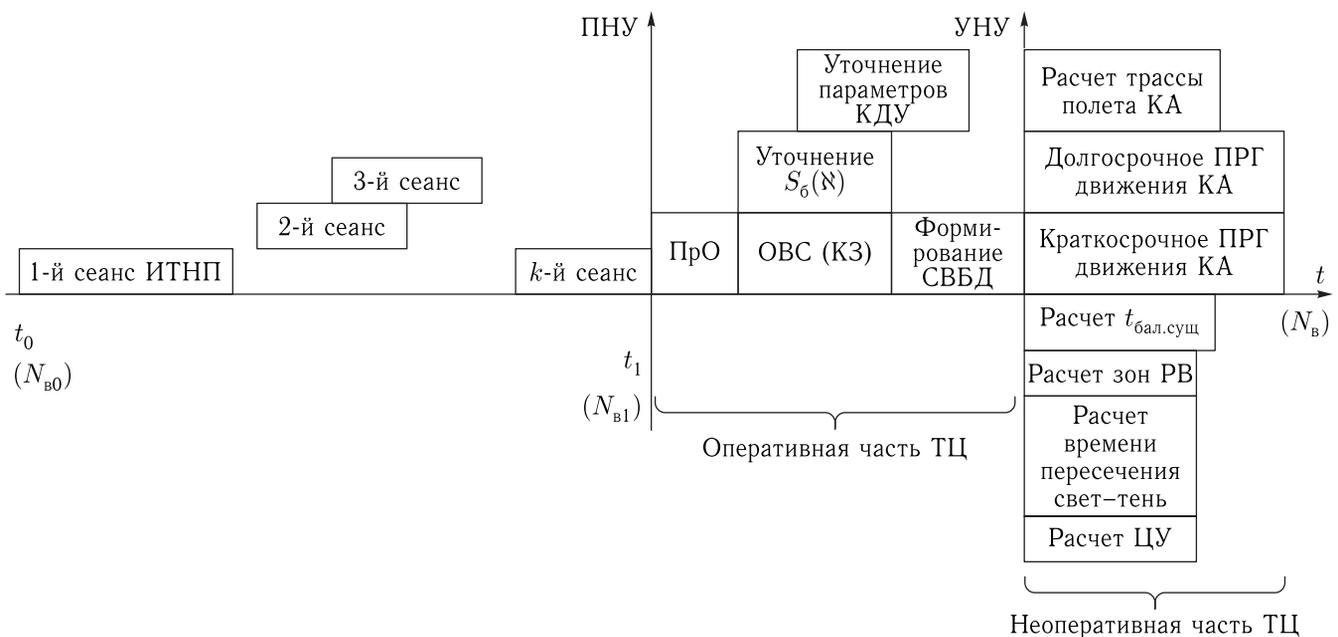


Рис. 4. Типовой технологический цикл НБО (обработка совместной выборки измерений).

Здесь и на рис. 5: ПНУ — прогнозируемые начальные условия (НУ), УНУ — уточненные НУ, ПрО — предварительная обработка, ИТНП — измерения текущих навигационных параметров, ОВС (КЗ) — определение вектора состояний (краевая задача), СВБД — совокупность выходных баллистических данных, N — шкала витков, N_B — номер витка, t — шкала времени, t_0 — начальный момент времени, ПРГ — прогноз движения КА, РВ — радиовидимость, КДУ — корректирующая двигательная установка, ЦУ — целеуказания

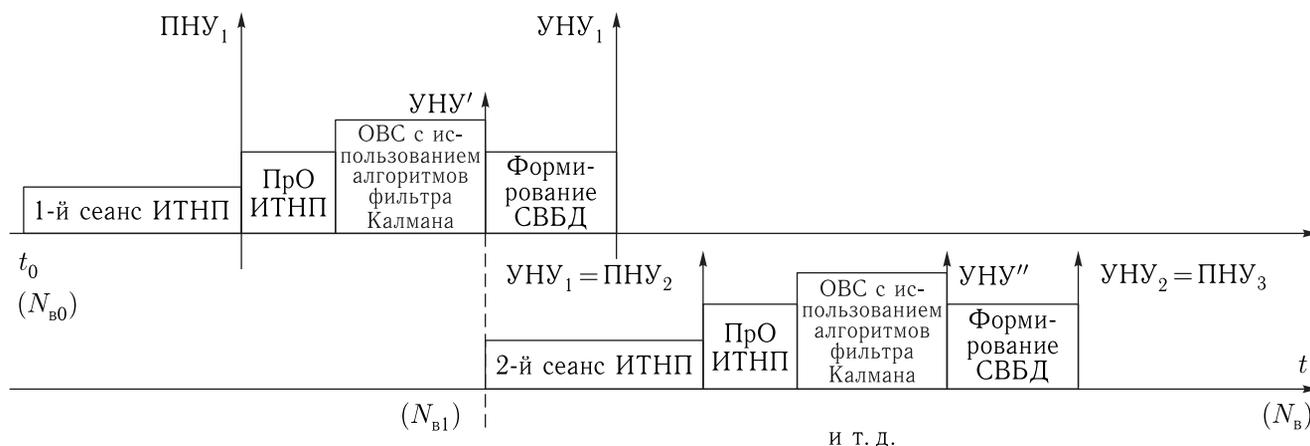


Рис. 5. Типовой баллистический цикл НБО (обработка выборки измерений нарастающего объема)

изображенных на рис. 4, предполагается обработка измерений текущих навигационных параметров по совместной выборке, то есть к началу проведения расчетов накоплена полная предполагаемая выборка ИТНП, в то время как рис. 4 иллюстрирует технологический цикл с обработкой ИТНП по сеансно. Как правило, при этом применяются для обработки алгоритмы фильтрации калмановского типа (например, линеаризованные многоитерационные рекуррентные алгоритмы обработки и другие).

Вариант представления технологических процессов НБО в виде ленточных графиков является весьма удобным для исследования и моделирования на ЭВМ и служит хорошей иллюстрацией применения рассматриваемых основных принципов реализации космических технологий.

Заключение

В статье рассмотрены основные принципы создания и применения ключевых навигационно-баллистических технологий, обеспечивающих эффективное управление космических аппаратов. К ним можно отнести принципы системности, комплексности, оптимальности (рациональности), устойчивости, перспективности, оперативности. Дан вариант общей классификации технологий, позволяющий выявить и соотнести между собой различные их типы и классы, что помогает (особенно на ранних этапах) эффективности их разработки. Примеры создания и представления типовых технологиче-

ских циклов НБО в виде ленточных графиков способствуют выявлению и структуризации направлений повышения эффективности управления КА.

Список литературы

1. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Кобзарь А.А. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Книга 1. Методы, модели и алгоритмы оценивания параметров движения. М.: Радиотехника, 2018. 479 с.
2. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Юрасов В.С., Стрельников С.В. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Книга 2. Системный анализ НБО. М.: Радиотехника, 2018. 487 с.
3. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 518 с.
4. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Яшин В.Г. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Часть I. Орбитальное движение, маневры и методы определения параметров орбит КА. Под ред. чл.-корр. РАН А.Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 336 с.
5. Тюлин А.Е., Дворкин В.В., Бетанов В.А. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Часть II. Космические системы пространственно-временного обеспечения на орбитах различных классов. Под ред. чл.-корр. РАН А.Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 302 с.