

НЕТРАДИЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПРОБЛЕМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАВИГАЦИОННО-БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Тюлин А. Е.¹, Бетанов В. В.²

Ключевые слова: космический аппарат, управление, автоматизированная система, навигационно-баллистическое обеспечение, космическая технология, обобщенный тензор, некорректная задача, обобщенно некорректная задача.

Аннотация.

Цель работы: провести исследование и скорректировать полученные результаты в отдельных элементах технологического цикла навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления космическими аппаратами для последующих этапов расчетов.

Методы: системный анализ НБО управления космическими аппаратами с помощью матричного и тензорного аппарата решения технологических операций НБО.

Результаты: рассмотрено представление проблем и трудностей решения задач технологического цикла НБО в виде матриц и обобщенных тензоров. Их построение позволяет анализировать (а в случае необходимости — корректировать) влияние погрешностей и ошибок решения, в том числе, на ранних стадиях технологических циклов НБО, что способствует достижению результата на последующих и/или более поздних этапах расчетов. Это дает возможность значительно улучшить качество решения целевых задач в подсистемах крупномасштабных наземно-космических систем типа ГАС РФ «Правосудие», «Выборы», «Управление». Указанное обеспечивает моделирование и создание интеллектуальных систем (экспертных и обучающих комплексов, расчетно-логических систем и др.) для автоматизированной реализации технологического цикла НБО. При этом предполагается математическое развитие вопросов представления элементов — «обобщенных тензоров», взаимосвязи их компонент и, в частности, трансформации размерностей в отдельных сечениях пространственных матриц.

DOI: 10.21681/1994-1404-2022-1-32-43

Введение

Стратегической целью Федеральной целевой программы³ «Комплексного развития космических информационных технологий на 2020—2030 годы» является достижение необходимого уровня обеспечения спутниковыми услугами всех отраслей экономики России, создание условий для цифровизации экономических, производственных, образовательных, научных, административных и культурных процессов развития страны с помощью спутниковых технологий,

расширение присутствия отечественных космических продуктов на международных рынках, максимальное использование возможностей существующих и перспективных космических систем и комплексов в интересах национальной, общественной и экономической безопасности страны.

Создание, использование и модернизация космических систем является в настоящее время одним из приоритетов технической политики государства в области высоких технологий. Значительная роль при этом отводится развитию перспективных космических технологий, их общих характеристик и особенностей⁴.

³ Афанасьев И. На новый уровень. Проект «Сфера» переходит к практической реализации // Русский космос. 2021. № 12 (34). С. 36—41.

⁴ Государственная программа «Космическая деятельность России», подпрограмма 8 — «Поддержка, развитие и использование системы ГЛОНАСС на период 2021—2030 годы» // СПС «Гарант».

¹ **Тюлин Андрей Евгеньевич**, доктор экономических наук, кандидат технических наук, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, генеральный директор АО «Российские космические системы», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: tyulin@spacecorp.ru

² **Бетанов Владимир Вадимович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, заместитель начальника центра АО «Российские космические системы», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: betanov_vv@spacecorp.ru

Космические технологии являются совокупностью различных технологий и процессов, направленной на создание *космических аппаратов* (КА) различного назначения, получения новых знаний о структуре Земли и космоса, а также формирования услуг на базе этих знаний [8, 10, 14, 15, 18, 19]. Примерами перспективных космических технологий в части управления КА служат:

- технологии перераспределения задач между бортовыми и наземными комплексами при управлении КА;
- технологии управления изделиями ракетно-космической техники с использованием спутников-ретрансляторов в режиме реального времени;
- технологии комплексной защиты информации в системах дистанционного зондирования Земли, космической навигации, связи и в командных радиоперелиниях;
- системы передачи информации в реальном масштабе времени с использованием высокоскоростных приемно-передающих устройств;
- робототехнические средства с элементами искусственного интеллекта в наземных и бортовых космических системах.

Ключевые технологические элементы навигационно-баллистического обеспечения (НБО), реализуемые в практике управления КА, включают:

- адаптацию понятий «технологическая операция» (ТО), «технологический цикл» (ТЦ) и «технологический процесс» (ТП)⁵ к информационно-расчетному обеспечению испытаний и эксплуатации КА;
- последовательную структурно-параметрическую оптимизацию моделей в едином ТЦ НБО оперативного управления КА;
- принципы построения *автоматизированной системы* ТЦ НБО (автоматизации, интеллектуализации, гибкости);
- управление знаниями НБО с программой управления знаниями и этапами сохранения критических знаний;
- технологии построения структур базы знаний, данных;
- технологии создания и развития экспертных систем НБО;
- реализацию новых технологий НБО управления КА в объекте общего предназначения — баллистическом центре командно-измерительного комплекса (технологии обработки навигационной информации бортовых автономных систем радионавигации (АСРН) в процессе НБО полетов КА);
- методологии синтеза обобщенной технологической модели НБО;
- технологические модели идентификации некорректных задач определения параметров движения космических объектов;

- технологии решения обобщенных некорректных задач НБО в условиях недостаточного объема измерительных данных [3] и других нестандартных особенностей [7];
- технологии управления и контроля выполнения технологического цикла НБО на основе интеллектуальных систем управления знаниями и др.

В условиях современной космической обстановки эффективность системы оперативного НБО (ОНБО) управления КА определяется рядом весьма жестких требований (в том числе к метрологической подсистеме), основными из которых являются:

- система ОНБО должна обладать свойством универсальности, так как ее функционирование направлено на осуществление комплекса работ по обеспечению управления КА различного целевого назначения ближнего и среднего космоса;
- навигационно-баллистические задачи должны решаться с высокой точностью и оперативностью, а оптимизация получаемых решений должна выполняться достаточно полно;
- результаты решения навигационно-баллистических задач должны обладать практически абсолютной достоверностью;
- все баллистические расчеты, анализ получаемых результатов и выработка рекомендаций относительно принятия решений должны выполняться в сроки, регламентируемые планом управления полетом;
- навигационно-баллистические задачи должны обеспечивать требуемую точность, оперативность и надежность результатов решений как в штатных, так и в нештатных ситуациях, которые могут иметь место в практике ОНБО управления КА.

Указанные *обстоятельства* требуют тщательного анализа возможного успешного решения как отдельных задач, так и общих проблем, возникающих в ходе выполнения технологических циклов НБО. Моделирование данных для подобных исследований возможно осуществить путем априорного матричного и обобщенного тензорного (неклассического математического варианта представления) анализа и разрешения проблем НБО.

Обсуждение задачи

Существует два основных подхода к изложению теории тензоров. При *координатном* подходе под тензором понимается матрица, компоненты которой преобразуются при переходе от одного координатного базиса к другому по определенным формулам. При *прямом* подходе тензор рассматривается как элемент линейного пространства, полученного специальным перемножением векторных пространств. От прямой записи тензора легко перейти к его координатному представлению, введя в пространстве тензоров базис. Таким образом, с чисто математической точки зрения оба подхода эквивалентны. Использование прямого

⁵ Программно-математическое обеспечение АСУ космическими аппаратами : учебник / Д. А. Ловцов, В. В. Бетанов, А. В. Лобан и др. Под общ. ред. Д. А. Ловцова. М. : ВА им. Петра Великого, 1995. 412 с.



Рис. 1. Матрица проблем решения задач типовой технологической операции (предварительной обработки измерений) управления КА

подхода предоставляет возможность проводить большинство преобразований с помощью тождеств, записанных в инвариантной форме, что позволяет сделать выкладки более компактными.

Авторами предложен вариант представления трудностей и проблем реализации матричного, а в более общем случае — обобщенного тензорного подхода при исследовании проблем реализации технологического цикла ОНБО.

Сущность подобного аппарата в общем случае отличается от классического математического описания тензорного анализа⁶ и находится на этапе разработки и становления. При представлении обобщенного тензора (пространственной матрицы исследуемых проблем решения задач НБО) исследуется связь отдельных элементов матриц-сечений представления трудностей элементов решаемой задачи (технологической операции НБО) и пути преодоления трудностей для достижения необходимых результатов решения задач.

Цель задачи построения матриц и обобщенных тензоров проблем решения ТО НБО — скорректировать полученные на отдельных этапах решения и оценить влияние погрешностей и ошибок в элементах технологических циклов НБО на последующие и/или более поздние этапы расчетов.

Это позволяет моделировать и создавать в том числе интеллектуальные системы (расчетно-логические системы, ориентированные на вычислительные алгоритмы, экспертные и обучающие комплексы и др.) для анализа и автоматизированной реализации ТЦ НБО. Примерами выполнения подобных задач могут слу-

жить, например, взаимосвязи решения некорректных (НкЗ) и обобщенно некорректных (ОНкЗ) задач НБО, параметрическая и структурная идентификация и обобщенная идентификация параметров математической модели движения КА.

Признаки и классификация технологий по отдельным признакам приведены в работе [15].

Проблемные вопросы

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*.

Авторами проведен анализ представления вариантов общей классификации технологий по различным признакам, в том числе по: обеспечению общих и частных показателей качества изделий (технологий), сферам использования, уровням значимости технологий, сферам использования и направлениям предметных областей применения [1, 2, 4—6].

Изображения матриц-сечений обобщенного тензора фрагмента технологического цикла НБО представлены на рис. 1 и рис. 2. Причем на рис. 1 представлена матрица проблем решения задачи типовой предварительной обработки (ПрО) измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) в технологическом цикле НБО управления КА, а на рис. 2 — фрагмент пространственной матрицы (фрагмент обобщенного тензора) проблем решения задач в элементах технологического цикла НБО (взаимодействие ТО ПрО и ТО определения вектора состояния (краевой задачи)).

Ключевыми причинами возникновения погрешностей (неточностей, ошибок) решения задачи определения вектора состояний (ОВС) КА в конкретной целевой обстановке выступают следующие факторы:

⁶ Вильчевская Е. Н. Тензорная алгебра и тензорный анализ : учебное пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 45 с.; Пальмов В. А. Элементы тензорной алгебры и тензорного анализа : учебное пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 109 с.

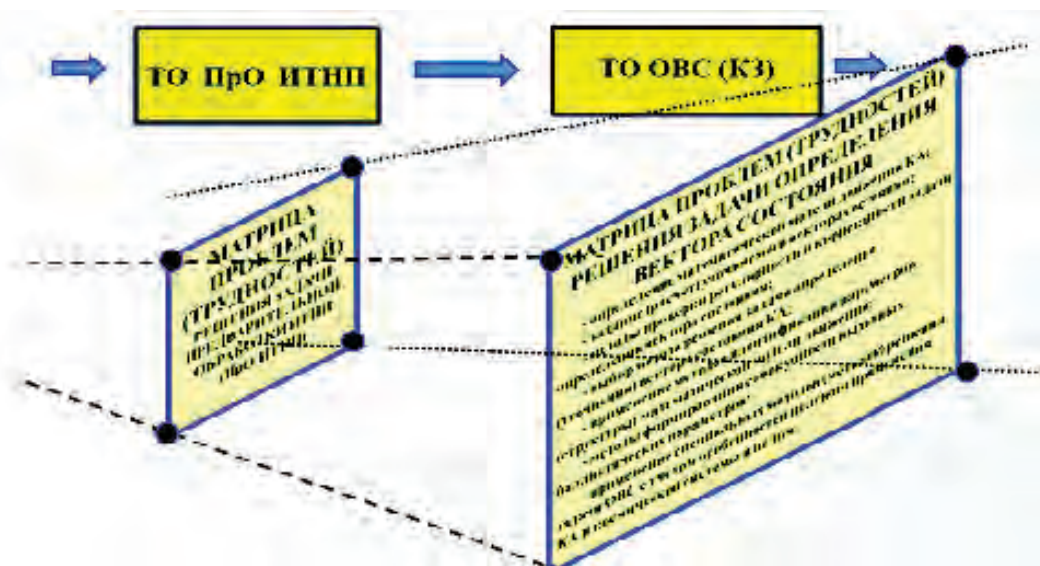


Рис. 2. Пространственная матрица (обобщенный тензор) проблем решения задач в элементах технологического цикла НБО

- выбор метода решения задачи определения (уточнения) вектора состояния КА;
- определение математической модели движения КА;
- задание (расчет) уточняемого вектора состояния;
- методы проверки регулярности и корректности задачи определения вектора состояния;
- применение методов идентификации параметров (структуры) математической модели движения;
- методы формирования совокупности выходных баллистических параметров;
- применение специальных методов (методик) решения задачи ОВС с учетом особенностей целевого применения КА и космической системы в целом и другие.

Условное описание связи между отдельными матрицами проблем и трудностей решения задач предварительной обработки ИТНП и определения вектора состояния КА представлено на рис. 3. На этом же рисунке расшифрованы элементы представленных матриц отмеченных технологических операций типового технологического цикла НБО. Подобного рода блоки механизма анализа и изучения проблем решения исследуемых задач, образующие обобщенные тензоры проблем НБО, могут быть построены и для других этапов выполнения технологических циклов НБО управления КА.

В практике управления КА как новой сферы деятельности могут возникнуть нештатные ситуации, которые необходимо максимально парировать для успешного выполнения задач полета. Примерами подобных нештатных ситуаций могут служить следующие [11—13]:

1. Ограниченный объем выборки ИТНП при оперативном определении параметров движения КА, обусловленный срывом штатной схемы реализации циклограммы проведения радиоконтроля орбиты (РКО).
2. Ограниченный объем выборки ИТНП при реализации штатной схемы РКО, обусловленный наличием

непригодных для определения параметров движения сеансов ИТНП.

3. Несоответствие расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному. Значение начального вектора состояния не обеспечивает требуемые результаты с использованием штатных процедур определения параметров движения КА по ИТНП.

4. Выполнение необходимых коррекций параметров решения задач НБО (оперативности, надежности и др.), связанных с особенностями их выполнения в сложившейся обстановке функционирования целевых космических систем (внешние факторы).

Особую значимость проблема определения вектора состояния в нештатных технологических циклах НБО приобретает в условиях динамики геополитической обстановки [7] и вследствие влияния экономических факторов на развитие инфраструктуры командно-измерительного комплекса. Решение данной проблемы приобретает важное значение также при обеспечении функционирования космических объектов с использованием подвижных командно-измерительных систем (КИС) [18, 19].

Неполная реализация штатной схемы радиоконтроля орбиты приводит к необходимости определения параметров движения КА по выборкам ИТНП малого объема.

Другой проблемой при оперативном определении вектора состояния КА 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



Рис. 3. Условное описание связи между отдельными матрицами проблем решения задач НБО управления КА

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, тогда причиной является влияние погрешности ИТНП [5, 6].

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. ОНБО 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 задачи определения вектора состояния. 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 внештатных ситуациях, как правило, характеризуется нарушением условий регулярности задачи определения вектора состояния КА по ИТНП [9, 12]. В вычислительном отношении это проявляется в расходимости итерационных процедур в составе алгоритмов определения параметров движения КА, в повышенной чувствительности получаемого решения к погрешностям в исход-

ных данных и, как следствие, в получении значений параметров орбиты со значительными искажениями, а иногда и противоречащих физическому смыслу решаемой задачи.

Согласно закону системности общей теории систем, объединение «задача НБО — инструмент решения (АС НБО)» (ЗИ), как и всякий другой объект, есть объект-система (рис. 4). При этом объект-система ЗИ НБО 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.

Выявление на основе предлагаемого инструментария (матриц и обобщенных тензоров) факта отнесения выполняемой задачи к разряду некорректных или обобщенно некорректных (рис. 5 и 6) позволяет применить один из заранее разработанных способов их решения. Практически отмеченный факт реализации технологических операций ОНБО осуществляется соответствующим модулем принятия решений с использованием интеллектуальных, в том числе экспертных систем.

На этапе отладки подобных ситуаций, как правило, проводится значительная исследовательская работа по возможному решению обобщенных некорректных задач в конкретных условиях применения КА [14].

Общий подход к системному описанию влияния деформирующих решение факторов инструментария и внешней среды в автоматизированной системе НБО может быть описан с применением следующего подхода.



Рис. 4. Объединение «задача НБО — инструмент решения (АС НБО)» (ЗИ) как объект-система

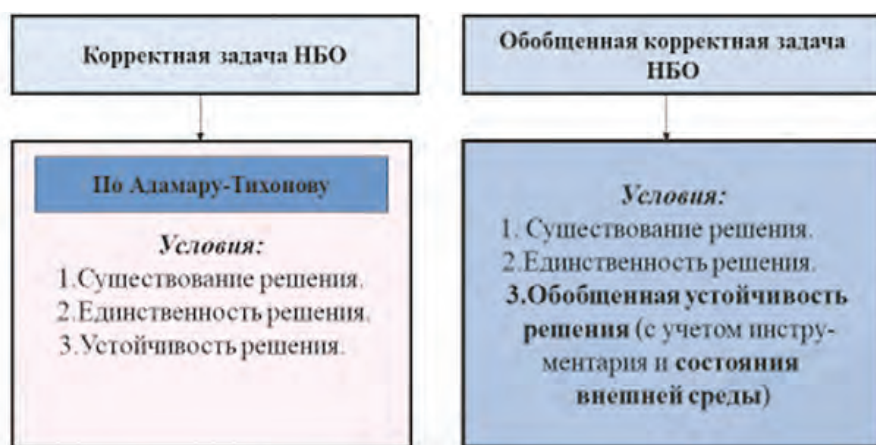


Рис. 5. Условия, обеспечивающие корректность и обобщенную корректность решения задач

Разработанная профессором А.В. Чечкиным общая теория⁷ ультра-операторов в значительной мере удовлетворяет требованиям исследования вышеназванных вопросов, так как в ней определяется и изучается новый вид отображений, являющихся обобщением классических понятий. Классические отображения осуществляют соответствия между точками множеств.

При этом подразумевается, что точки известны с абсолютной точностью. Новые отображения, названные *ультра-отображениями*, осуществляют соответствия между сведениями («информациями») о точках множеств. Таким образом, достигается общность и возможность комплексного рассмотрения вопроса при сохранении всех возможностей детализированного описания исследуемого предмета. Основная конструкция теории, названной теорией ультра-систем, позволяет

по отдельным сведениям о точке прообраза получать отдельные сведения о точке образа. На множестве ультра-операторов определяются различные операции и изучается их алгебра [17].

Пример. Пусть имеется отображение [9]:

$$A: X \rightarrow Z \quad (1)$$

и пусть P_x, P_z — решетки достоверностей для множеств X, Z соответственно. Если любой информации о произвольной точке $x \in X$ поставлена в соответствие единственная информация о точке $Ax, z \in Z$, то говорят, что имеется *ультра-отображение* над A (обозначаемое далее $A^\wedge$), при этом отображение A называют опорным.

Если X, Z — два множества, $A: X \rightarrow Z$ — отображение (1) и $X^\wedge_{\text{инстр}}, Z^\wedge_{\text{инстр}}$ — ультра-оснащения X, Z , тогда отображение

$$A^\wedge_{\text{инстр}}: X^\wedge_{\text{инстр}} \rightarrow Z^\wedge_{\text{инстр}} \quad (2)$$

называют *ультра-оператором* над A , если коммутативна диаграмма, изображенная на рис. 7.

⁷ Соболева Т.С., Чечкин А.В. Дискретная математика : учебник / Под ред. А. В. Чечкина. М. : Изд. центр «Академия», 2006. 256 с.

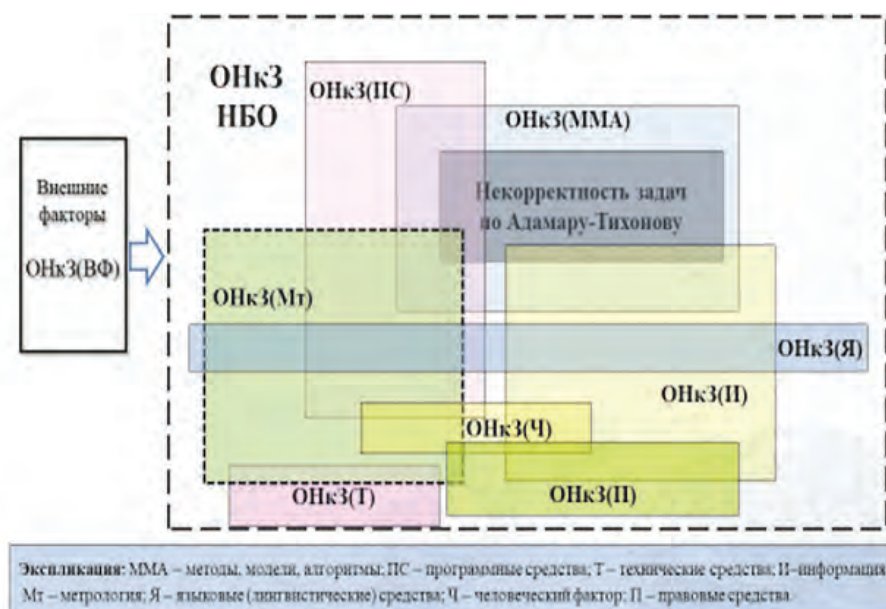


Рис. 6. Соотношение понятий «некорректная» и «обобщенно некорректная» задачи (ОНКЗ)

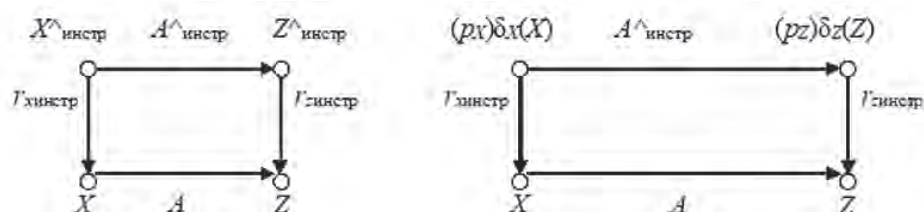


Рис. 7. Коммутативная диаграмма с ультра-оператором, учитывающим влияние инструмента решения задачи

На рис. 7 обозначения $r_{\text{инстр}}$, $r_{\text{зинстр}}$ — естественные проекции декартова произведения $P \times L \times X = X^{\wedge}_{\text{инстр}}$ на последний сомножитель (где L — решетка понятий для X):

$$r_{\text{инстр}}: X^{\wedge}_{\text{инстр}} \rightarrow X, r_{\text{зинстр}}: Z^{\wedge}_{\text{инстр}} \rightarrow Z \quad (3)$$

Коммутативность диаграммы рис. 7 означает равенство двух композиций [9]: $Ar_{\text{инстр}} = r_{\text{зинстр}}A^{\wedge}_{\text{инстр}}$.

Вводимые отображения обобщенно описывают «влияние» инструментария в объект-системе ЗИ на решение задачи НБО. Вместе с тем объект-система «погружена» в среду, определяющую целевое получение результата задачи в конкретных условиях и ограничениях. В различных обстоятельствах указанные условия, вызванные внешними факторами и свойствами среды, могут изменяться («дышать»). Эти изменения происхо-

дят либо «плавно» (равномерно) с необходимыми постепенными деформациями, либо «революционно» со скачкообразными изменениями характеристик среды (параметрических и/или структурных) и требований как к процессу получения результата, так и к самому результату.

Системные свойства среды, оказывающие важное влияние на решение задач, могут оставаться неизменными в процессе выполнения вычислений, а могут существенно изменяться в моменты выполнения технологического цикла НБО. В связи с этим целесообразно расширить описание ультра-оснащений и соответствующих ультра-операторов. При этом диаграмма ультра-оснащений будет выглядеть следующим образом (рис. 8).

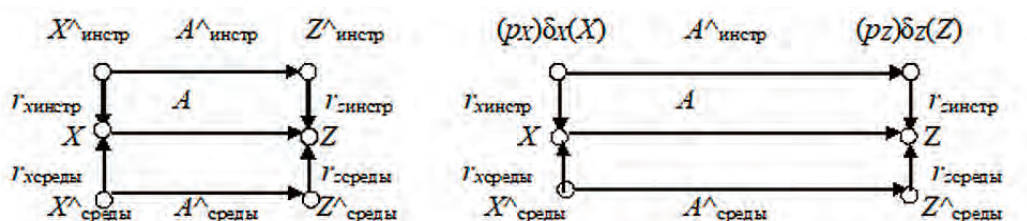


Рис. 8. Коммутативная диаграмма с двумя ультра-операторами, учитывающими влияние инструмента решения и среды (внешних факторов)

На рис. 8 обозначения $\Gamma_{\text{среды}}$, $\Gamma_{\text{среды}}$ — естественные проекции декартова произведения $P \times L \times X = X^{\wedge}_{\text{среды}}$ на последний сомножитель:

$$r_{\text{среды}}: X^{\wedge}_{\text{среды}} \rightarrow X, r_{\text{среды}}: Z^{\wedge}_{\text{среды}} \rightarrow Z \quad (4)$$

Описание отображений изменится, если деформации внешней среды потребуют коррекции использования ультра-оснащений опорных множеств. Например,

вместо ультра-оснащений $X^{\wedge}_{\text{среды}}$, $Z^{\wedge}_{\text{среды}}$, $Z^{\wedge}_{\text{среды}}$ окажется необходимым использование измененных ультра-оснащений $X^{*\wedge}_{\text{среды}}$, $Z^{*\wedge}_{\text{среды}}$.

С учетом влияния среды (внешних факторов) ультра-оператор $A^{\wedge}_{\text{инстр}}$ заменяется ультра-оператором $A^{\wedge}_{\text{среды}}$, а с учетом трансформирующихся ультра-оснащений — ультра-оператором $A^{*\wedge}_{\text{среды}}$.

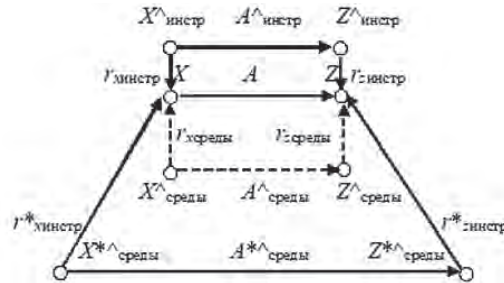


Рис. 9. Коммутативная диаграмма с тремя ультра-операторами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих порознь и неодновременно

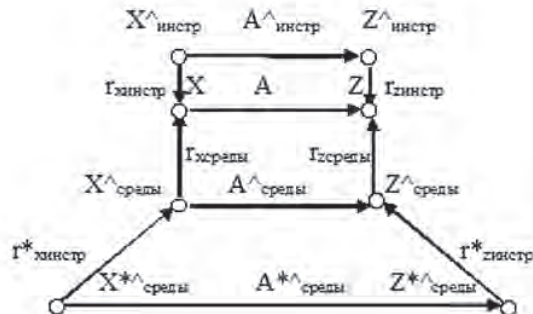


Рис. 10. Коммутативная диаграмма с тремя ультра-операторами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих одновременно

Коммутативная диаграмма с тремя ультра-операторами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих порознь и неодновременно, приведена на рис. 9, а коммутативная диаграмма с тремя ультра-операторами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих одновременно — на рис. 10.

Применение ультра-операторов и ультра-систем позволяет эффективно описать, в числе прочего, обобщенные структурные характеристики измерительных задач, а именно: *обобщенную наблюдаемость*, *обобщенную управляемость*, *обобщенную идентифицируемость* и др. на образе объект-системы (а не только в ее математическом проявлении при постановке и решении задачи) [3, 16].

Изменение внешних условий (требований) в процессе выполнения технологического цикла НБО, как правило, связано с:

- 1) переходом на *сокращенные* варианты решения баллистических задач (выполнения технологических операций);
- 2) улучшением *надежностных* характеристик получения заданных оценок искомых параметров;
- 3) повышением *точностных* характеристик выходного результата расчетов и др.

Важным примером применения описываемого подхода к решению обобщенных некорректных задач при НБО управления КА служит разработка обобщенной технологической модели оперативного определения параметров движения (ОПД) КА.

Обобщенная технологическая модель решения некорректных задач ОПД космического аппарата по ИТНП — формализованное унифицированное описание структуры, функциональных характеристик, математических моделей и интерфейсов взаимодействия объектов автоматизированной системы реализации технологического цикла ОПД космических аппаратов по ИТНП в целях обеспечения получения выходных данных, удовлетворяющих установленным в эксплуатационно-технических данных требованиям к точности и оперативности получаемых решений.

В основу парадигмы построения модели положен *принцип инвариантности* по отношению к архитектуре автоматизированных систем оперативного навигационно-баллистического обеспечения, который реализуется в виде шаблона архитектурного уровня. Уровень обобщения технологической модели решения некорректных задач ОПД — набор интерфейсов (подсистем), конкретная имплементация которых определяется тезаурусом методов и алгоритмов



*Рис. 11. Обобщенная технологическая модель
оперативного определения параметров движения КА*

ОНБО, реализуемых в конкретной автоматизированной системе.

Декомпозиция обобщенного технологического цикла определения параметров движения по ИТНП позволяет выделить ряд основных подсистем, содержащих набор реализующих их функциональных характеристик. Концептуальный подход к решению вопроса исследований иллюстрируется структурно-функциональной схемой на рис. 11.

В рассматриваемом примере анализируется схема решения так называемых обобщенных некорректных задач первого и второго рода с введенными модификациями с учетом представления решения задач в объект-системе «задача НБО — инструмент ее решения (АС НБО)» [13, 14]. Дополнительно в подобной схеме могут быть применены обобщенные структурные свойства измерительных задач, в частности, понятие «обобщенная наблюдаемость». Показано, что результаты определений параметров движения КА на этапе выведения на орбиту демонстрируют возможность обеспечения требуемых точностных характеристик в условиях неполной реализации запланированной схемы контроля орбиты и в условиях штатной схемы контроля орбиты на короткой мерной базе.

Заключение

В работе рассмотрено представление проблем и трудностей решения задач технологического цикла НБО в виде матриц и обобщенных тензоров. Их построение позволяет анализировать (а в случае необходимости корректировать) влияние погрешностей и ошибок решения, в том числе на ранних стадиях технологических циклов НБО, что способствует достижению результата на последующих и/или более поздних этапах расчетов. Это обеспечивает моделирование и создание интеллектуальных систем (экспертных и обучающих комплексов, расчетно-логических систем, использующих вычислительные алгоритмы и др.) для автоматизированной реализации ТЦ НБО. При этом предполагается математическое развитие вопросов представления элементов, названных «обобщенными

тензорами», взаимосвязи их компонент и, в частности, трансформации размерностей в отдельных сечениях пространственных матриц.

В работе рассмотрены также преимущества и целесообразность применения и использования введенного нетрадиционного подхода. Матрицы и обобщенный тензор трудностей и проблем решения НБО управления КА:

- 1) позволяют комплексно (интегрально) рассмотреть взаимосвязь решения отдельных сложных задач управления КА в технологическом цикле НБО друг с другом (в прямой и обратной последовательности);
- 2) позволяют определить влияние погрешностей и ошибок решения, в том числе на ранних стадиях технологических циклов НБО, корректируя достижение результата на последующих и/или более поздних этапах расчетов;
- 3) обеспечивают основу моделирования процесса выполнения технологических операций и проведение анализа реальной возможности достижения целей расчетов;
- 4) способствуют созданию индивидуальных базовых языков функционирования интеллектуальных систем и реализацию в целом расчетно-логических систем, экспертных и обучающих комплексов и др. для автоматизированного контроля ТЦ НБО и анализа результатов расчетов;
- 5) повышают оперативность и надежность нахождения приемлемого решения в особых условиях (некорректных, обобщенно некорректных и др. задач).

Целесообразность использования представления погрешностей и ошибок решения с применением обобщенных тензоров связана с:

системностью проведения описанного исследования и анализа трудоемких и многоплановых операций повышения надежности НБО;

отсутствием непосредственного направления поиска причин однозначного достижения целей расчетов без применения подобного подхода;

известными практическими преимуществами данного подхода для поиска решений.

Литература

1. Андреев Г.И., Летунов В.В., Андреева Д.В. Эффективная спутниковая телесигнализация в подсистеме безопасности ГАС РФ «Правосудие» // Правовая информатика. 2018. № 3. С. 23—27. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-1-23-27.
2. Дворкин В.В., Карутин С.Н. Высокоточные навигационные определения по сигналам ГНСС // Вестник СибГАУ им. М. Ф. Решетнева. 2013. № 6 (52). С. 70—76.
3. Ловцов Д.А. Определение информационных условий наблюдаемости и управляемости космических аппаратов // Труды Всеросс. конф. с междунар. участием «Современные проблемы теоретической астрономии» в 3-х т. Т. 3 / РАН, Ин-т теор. астрон. СПб.: ИТА РАН, 1994. С. 61—62.
4. Ловцов Д.А., Андреев Г.И. Прецизионное прогнозирование движения техногенных объектов в околоземном космическом пространстве // Информация и космос. 2015. № 2. С. 103—110.
5. Ловцов Д.А., Карпов Д.С. Динамическое планирование навигационных определений объектов ракетно-космической техники в АСУ лётными испытаниями // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2010. № 1. С. 53—60.

6. Ловцов Д.А., Панюков И.И. Информационная технология автоматизированного планирования определения навигационных параметров объектов ракетной техники // Автоматика и телемеханика. 1995. № 12. С. 32—46.
7. Ловцов Д.А., Шевляков А.С. Информационно-математическое обеспечение оперативной радиационной защиты космических аппаратов специального назначения // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 4. С. 96—101.
8. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов : монография. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 518 с.
9. Потюпкин А.Ю., Чечкин А.В. Искусственный интеллект на базе информационно-системной избыточности : монография. М. : КУРС, 2019. 384 с.
10. Романов А.А., Тюлин А.Е. Шестой технологический уклад в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4. Вып. 4. С. 64—82.
11. 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. А.Е. Тюлина. М. : Инновац. машиностроение, 2020. 336 с.
12. Тюлин А.Е., Дворкин В.В., Бетанов В.В. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Часть II. Космические системы пространственно-временного обеспечения на орбитах различных классов / Под ред. А.Е. Тюлина. М. : Инновац. машиностроение, 2020. 302 с.
13. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Кобзарь А.А. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Кн. 1. Методы, модели и алгоритмы оценивания параметров движения. М. : Радиотехника, 2018. 479 с.
14. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Юрасов В.С., Стрельников С.В. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Кн. 2. Системный анализ НБО. М. : Радиотехника, 2018. 487 с.
15. Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Ключевые навигационно-баллистические технологии, повышающие эффективность управления КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. Вып. 3. С. 3—10.
16. Тюлин А.Е., Круглов А.В., Бетанов В.В. Уточнение согласующих коэффициентов математической модели движения КА с использованием понятия «обобщенная наблюдаемость» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. Вып. 4. С. 3—13.
17. Чечкин А. В. Математическая информатика : монография. М. : Наука, 1991. 412 с.
18. Tyulin A., Chursin A. Advanced development and sustainability of a company in the conditions of crises and transformation of global economies. Tallinn: EurAsian Scientific Editions Ltd., 2021. 428 pp.
19. Tyulin, A.E., Chursin, A.A., Yudin, A.V. Assessing the Potential for Successful Introduction of a Radically New Product (2021). Russian Engineering Research, 41 (10), pp. 931-933.

Рецензент: **Бурый Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, эксперт РАН, директор департамента ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

NON-TRADITIONAL ASSESSMENT OF PROBLEMS OF SOLVING TASKS OF NAVIGATION AND BALLISTIC SUPPORT FOR SPACECRAFT CONTROL

Andrei Tiulin⁸, Vladimir Betanov⁹

Keywords: spacecraft, control, automated system, navigation and ballistic support, space technology, generalised tensor, ill-posed problem, generalised ill-posed problem.

⁸ **Andrei Tiulin**, Andrei Tiulin, Dr.Sc. (Economics), Ph.D. (Technology), corresponding member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Director General of AO "Rossiiskie kosmicheskie sistemy" [Russian Space Systems JSC], Moscow, Russian Federation.

E-mail: tyulin@spacecorp.ru

⁹ **Vladimir Betanov**, Dr.Sc. (Technology), Professor, corresponding member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Deputy Head of the AO "Rossiiskie kosmicheskie sistemy" [Russian Space Systems JSC] Centre, Moscow, Russian Federation.

E-mail: betanov_vv@spacecorp.ru

Abstract.

Purpose of the work: carrying out a study and correcting the obtained results in individual elements of the technological cycle of spacecraft control navigation and ballistic support (NBS) for subsequent stages of calculations.

Methods used: system analysis of spacecraft control NBS using the matrix and tensor apparatus for solving problems of the NBS technological operations.

Results obtained: a presentation of problems and difficulties in solving problems of the NBS technological cycle in the form of matrices and generalised tensors is considered. Their construction allows to analyse (and, if necessary, correct) the influence of inaccuracies and errors in the solution, including at the early stages of the NBS technological cycles, which promotes achieving the result at subsequent and/or later stages of calculations. This makes it possible to significantly improve the quality of solving target problems in subsystems of large-scale ground and space systems such as the government automated systems of the Russian Federation (GAS RF) "Pravosudie" ["Justice"], "Vybery" ["Elections"], "Upravlenie" ["Administration"] which, in turn, provides for modelling and setting up intelligent systems (expert and training complexes, calculation logic systems, etc.) for automated implementation of the NBS technological cycle. This assumes mathematical development of issues of representation of elements, called "generalised tensors", the relationship of their components and, in particular, transformation of dimensions in individual sections of spatial matrices.

References

1. Andreev G.I., Letunov V.V., Andreeva D.V. Effektivnaia sputnikovaia telesignalizatsiia v podsysteme bezopasnosti GAS RF "Pravosudie". Pravovaia informatika, 2018, No. 3, pp. 23–27. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-1-23-27.
2. Dvorkin V.V., Karutin S.N. Vysokotochnye navigatsionnye opredeleniia po signalam GNSS. Vestnik SibGAU im. M. F. Reshetneva, 2013, No. 6 (52), pp. 70–76.
3. Lovtsov D.A. Opredelenie informatsionnykh uslovii nabludaemosti i upravliaemosti kosmicheskikh apparatov. Trudy Vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem "Sovremennye problemy teoreticheskoi astronomii" v 3-kh t., t. 3., RAN, In-t teor. astron. SPb.: ITA RAN, 1994, pp. 61–62.
4. Lovtsov D.A., Andreev G.I. Pretsizionnoe prognozirovaniye dvizheniia tekhnogennykh ob"ektov v okolozemnom kosmicheskom prostranstve. Informatsiia i kosmos, 2015, No. 2, pp. 103–110.
5. Lovtsov D.A., Karpov D.S. Dinamicheskoe planirovaniye navigatsionnykh opredelenii ob"ektov raketno-kosmicheskoi tekhniki v ASU letnymi ispytaniiami. Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina, 2010, No. 1, pp. 53–60.
6. Lovtsov D.A., Paniukov I.I. Informatsionnaia tekhnologiya avtoma-tizirovannogo planirovaniia opredeleniia navigatsionnykh parametrov ob"ektov raketnoi tekhniki. Avtomatika i telemekhanika, 1995, No. 12, pp. 32–46.
7. Lovtsov D.A., Shevliakov A.S. Informatsionno-matematicheskoe obespecheniye operativnoi radiatsionnoi zashchity kosmicheskikh apparatov spetsial'nogo naznacheniia. Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina, 2017, No. 4, pp. 96–101.
8. Lysenko L.N., Betanov V.V., Zviagin F.V. Teoreticheskie osnovy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniia kosmicheskikh poletov: monografiia. M.: MGTU im. N.E. Baumana, 2014. 518 pp.
9. Potiupkin A.Iu., Chechkin A.V. Iskusstvennyi intellekt na baze informatsionno-sistemnoi izbytochnosti: monografiia. M.: KURS, 2019. 384 pp.
10. Romanov A.A., Tiulin A.E. Shestoi tekhnologicheskii uklad v kosmicheskom priborostroenii. Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy, 2017, t. 4, vyp. 4, pp. 64–82.
11. Tiulin A.E., Betanov V.V., Iashin V. G. Orbital'nye segmenty kosmicheskikh sistem prostranstvenno-vremennogo obespecheniia. Chast' I. Orbital'noe dvizheniye, manevery i metody opredeleniia parametrov orbit KA. Pod red. A.E. Tiulina. M.: Innovats. mashinostroenie, 2020. 336 pp.
12. Tiulin A.E., Dvorkin V.V., Betanov V.V. Orbital'nye segmenty kosmicheskikh sistem prostranstvenno-vremennogo obespecheniia. Chast' II. Kosmicheskie sistemy prostranstvenno-vremennogo obespecheniia na orbitakh razlichnykh klassov. Pod red. A.E. Tiulina. M.: Innovats. mashinostroenie, 2020. 302 pp.
13. Tiulin A.E., Betanov V.V., Kobzar' A.A. Navigatsionno-ballisticheskoe obespecheniye poleta raketno-kosmicheskikh sredstv. Kn. 1. Metody, modeli i algoritmy otsenivaniia parametrov dvizheniia. M.: Radiotekhnika, 2018. 479 pp.
14. Tiulin A.E., Betanov V.V., Iurasov V.S., Strel'nikov S.V. Navigatsionno-ballisticheskoe obespecheniye poleta raketno-kosmicheskikh sredstv. Kn. 2. Sistemnyi analiz NBO. M.: Radiotekhnika, 2018. 487 pp.
15. Tiulin A.E., Betanov V.V. Kliuchevye navigatsionno-ballisticheskie tekhnologii, povyshaiushchie effektivnost' upravleniia KA. Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy, 2021. T. 8, vyp. 3, pp. 3–10.
16. Tiulin A.E., Kruglov A.V., Betanov V.V. Utochneniye soglasuiushchikh koeffitsientov matematicheskoi modeli dvizheniia KA s ispol'zovaniem poniatiia "obobshchennaia nabludaemost". Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy, 2020. T. 7, vyp. 4, pp. 3–13.
17. Chechkin A. V. Matematicheskaya informatika: monografiia. M.: Nauka, 1991. 412 pp.
18. Tyulin A., Chursin A. Advanced development and sustainability of a company in the conditions of crises and transformation of global economies. Tallinn: EurAsian Scientific Editions Ltd., 2021. 428 pp.
19. Tyulin, A.E., Chursin, A.A., Yudin, A.V. Assessing the Potential for Successful Introduction of a Radically New Product (2021). Russian Engineering Research, 41 (10), pp. 931-933.