

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

УДК 621.3;629;681;316 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.4.13

**Матрицы и обобщенные тензоры представления проблем  
решения задач навигационно-баллистического обеспечения  
управления КА**

**А. Е. Тюлин**, д. э. н., к. т. н., член-корреспондент РАН, *tyulin@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. В. Бетанов**, д. т. н., проф., член-корреспондент РАН, *betanov\_vv@spacecorp.ru*  
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Рассмотрено представление проблем и трудностей решения задач технологического цикла навигационно-баллистического обеспечения (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 и т. п.) для автоматизированной реализации технологического цикла (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.

**Ключевые слова:** космический аппарат, навигационно-баллистическое обеспечение, оперативное навигационно-баллистическое обеспечение, космическая технология, обобщенный тензор. некорректная задача

**Matrices and Generalized Tensors  
for Representing the Problems  
of Navigation and Ballistic Support of Spacecraft Control**

**A. E. Tyulin**, *Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), Prof.,*  
*Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, tyulin@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**V. V. Betanov**, *Dr. Sci. (Engineering), Prof.,*  
*Corresponding Member of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, betanov\_vv@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The presentation of problems and difficulties in solving the problems of the technological cycle of navigation and ballistic support (NBS) in the form of matrices and generalized tensors is considered. Their construction makes it possible to analyze (and, if necessary, correct) the influence of inaccuracies errors of the solution, including at the early stages of the NBS technological cycles, which contributes to the achievement of the result at subsequent and/or later stages of calculations. This makes the modeling and creation of intelligent systems possible (expert and training complexes, calculation and logic systems, etc.) for automated implementation of the technological cycle (TC) of NBS. This assumes the mathematical development of the issues of representation of elements, called "generalized tensors", the relationship of their components and, in particular, the transformation of dimensions in individual sections of spatial matrices.

**Keywords:** spacecraft, navigation and ballistic support, operational navigation and ballistic support, space technology, generalized tensor. ill-posed problem

## Общие замечания

Создание, использование и модернизация космических систем является важным приоритетом технической политики государства в области высоких технологий. Значительная роль при этом отводится развитию перспективных космических технологий, их общих характеристик и особенностей [1, 3, 4].

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.

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, в системах космической навигации, в системах 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), цикл (ТЦ) и процесс (ТП) к информационно-расчетному обеспечению испытаний и эксплуатации КА;

- последовательную структурно-параметрическую оптимизацию моделей в едином ТЦ НБО оперативного управления КА;

- принципы построения автоматизированной системы (АС) ТЦ НБО (автоматизации, интеллектуализации, гибкости);

- управления знаниями НБО с программой управления знаниями и этапами сохранения критических знаний;

- технологии построения структур базы знаний, данных;

- технологии создания и развития экспертных систем (ЭС) НБО;

- новые технологии навигационно-баллистического обеспечения управления КА в объекте общего предназначения — баллистическом центре наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ), включающие совместную обработку навигационной информации бортовых автономных систем радионавигации (АСРН) с данными наземных измерительных комплексов;

- 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 и других нестандартных особенностей;

- технологии управления и контроля выполнения технологического цикла НБО на основе интеллектуальных систем управления знаниями и другие.

Для успешного выполнения существующих и перспективных космических технологий предъявляются жесткие требования к реализации совокупности комплексов и систем, обеспечивающих оперативное, надежное и устойчивое функционирование прежде всего элементов системы оперативного навигационно-баллистического обеспечения (ОНБО) управления космических объектов. Указанное обстоятельство основывается на необходимости решения соответствующих задач с абсолютной достоверностью, точностью и оперативностью. Кроме того, сама система ОНБО должна обладать свойствами универсальности, предусматривающими выполнение работ по обслуживанию космических аппаратов с различными целевыми функциями на различных классах орбит.

Осуществление контроля выполнения технологических операций (решения отдельных баллистико-навигационных задач) в технологическом цикле НБО управления КА удобно реализовывать

с использованием матричного, а в более общем случае обобщенного тензорного анализа в неклассическом варианте представления проблем реализации. Причем можно воспользоваться двумя вариантами представления тензоров: координатный и прямой [13, 14]. В первом случае под тензором понимается матрица, компоненты которой преобразуются при переходе от одного координатного базиса к другому по определенным правилам. В другом случае тензор рассматривается как элемент линейного пространства, полученный специальным перемножением векторных пространств. От прямой записи тензора можно перейти к его координатному представлению, для чего необходимо ввести в пространстве тензоров некоторый базис. С учетом отмеченного обстоятельства оба подхода к описанию тензоров эквивалентны. Причем второй подход (а именно — прямой) позволяет формировать выкладки более компактными.

При рассмотрении решаемой задачи в простейшем варианте представления проблем и трудностей выполнения ТО НБО неклассическое описание тензоров может быть рассмотрено в виде пространственных матриц с соответствующими сечениями для каждой технологической операции. Элементы одной матрицы-сечения связаны с элементами (отдельными или интегральными) другой матрицы-сечения. Именно подобная модель позволяет заранее предусмотреть и использовать вариант разрешения конфликтных ситуаций выполняемого технологического цикла. Одновременно необходимо отметить дополнительные математические сложности описания рассматриваемых пространственных матриц, которые в общем случае могут возникнуть из-за различных размерностей в неодинаковых сечениях подобных тензоров. Указанное замечание предусматривает дальнейшее развитие математической теории алгебраических операций над рассматриваемыми тензорами.

Возможен нетрадиционный подход обобщенного тензорного представления проблем реализации технологического цикла ОНБО. Сущность подобного аппарата в общем случае отличается от классического математического описания тензорного анализа [15, 16] 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 проблем решаемой задачи (технологической операции НБО) и путей преодоления трудностей для достижения необходимых результатов решения задач.

Цель задачи построения матриц и обобщенных тензоров проблем решения технологических операций (ТО) навигационно-баллистического обеспечения — 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.

Данный подход позволяет моделировать и создавать в том числе интеллектуальные системы (расчетно-логические системы, ориентированные на вычислительные алгоритмы, экспертные и обучающие комплексы и т.п.) для анализа и автоматизированной реализации технологических циклов (ТЦ) НБО. Примерами выполнения подобных задач могут служить, 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 авторских работах [8, 9].

## Проблемные вопросы

При создании и реализации новых космических технологий важен тщательный анализ основных принципов их создания и применения, а именно: системности, комплексности, оптимальности (чаще рациональности), устойчивости, перспективности и оперативности [5, 6]. В процессе написания статьи проведен анализ представления вариантов общей классификации технологий по различным признакам, в том числе по обеспечению общих и частных показателей качества изделий (технологий), по сферам использования, по уровням значимости технологий, по сферам использования и направлениям предметных областей применения [10].

Изображения матриц-сечений обобщенного тензора фрагмента технологического цикла НБО



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

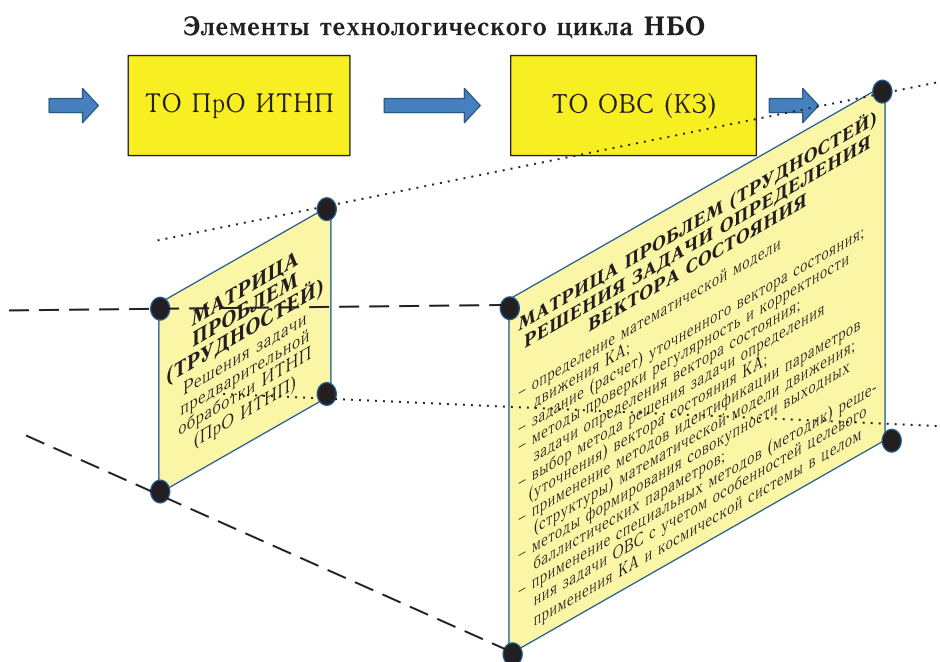


Рис. 2. Пространственная матрица (обобщенный тензор) проблем решения задач в элементах технологического цикла НБО

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 состояния (ОВС) космического аппарата в конкретной целевой обстановке выступают следующие факторы:

- 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.

Управление космических аппаратов относится к новой сфере научно-технической деятельности человечества. При летных испытаниях и эксплуатации космических объектов могут возникнуть нештатные ситуации, которые необходимо максимально парировать для успешного выполнения задач полета. Подобными нештатными ситуациями могут служить следующие примеры [5–8].

1. Недостаточный (ограниченный) объем выборки измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) при оперативном определении параметров движения КА, обусловленный срывом штатной схемы проведения радиоконтроля орбиты (РКО).

2. Наличие непригодных для определения параметров движения сеансов ИТНП из-за так называемых аномальных погрешностей измерений.

3. Несоответствия расчетных отклонений начальных векторов состояния КА реальному движению, которые не обеспечивают требуемых результатов пространственно-временного перемещения центра масс КА (отсутствие сходимости краевой задачи в силу значительных расхождений начальных условий).

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

С точки зрения вычислительной математики задача определения движения КА по выборке ИТНП ограниченного объема принадлежит к классу некорректных задач, когда решение неустойчиво к малым возмущениям исходных данных. В условиях реализации штатной схемы ИТНП также порой не удается получить требуемое по точности решение вследствие смещения оценки ВС, обусловленного наличием значительных по величине погрешностей ИТНП. Анализ существующих методов статистической обработки ИТНП при ОПД КА показывает, что их применение не позволяет в полном объеме решить проблемные вопросы как вычислительного, так и методического характера.

Решение указанных выше проблем методического характера неразрывно связано с решением проблемных вопросов технологического плана. В современных условиях научно-технический прогресс оказывает большое влияние на развитие информационных технологий, вследствие этого возникает и практическая потребность изменения фундаментальных парадигм организации и технологии навигационно-баллистического обеспечения на базе технологических решений, основанных на развитии распределенных информационно-вычислительных ресурсов. Технологии их использования получают все больший приоритет в практике НБО. При этом наблюдаются тенденции к исключительно распределенной схеме создания, поддержания и хранения ресурсов НБО и выполнения на их базе вычислений. В то же время существует стремление к виртуальному объединению информационных и вычислительных ресурсов НБО на уровне предоставления доступа к ним.

В связи с тем, что интеграция информационных и вычислительных ресурсов в единую среду и организация доступа к ним является одним из важнейших направлений развития современных информационных технологий. Таким образом, можно постулировать принцип формирования на базе ресурсов сети единого поля информационных и вычисли-



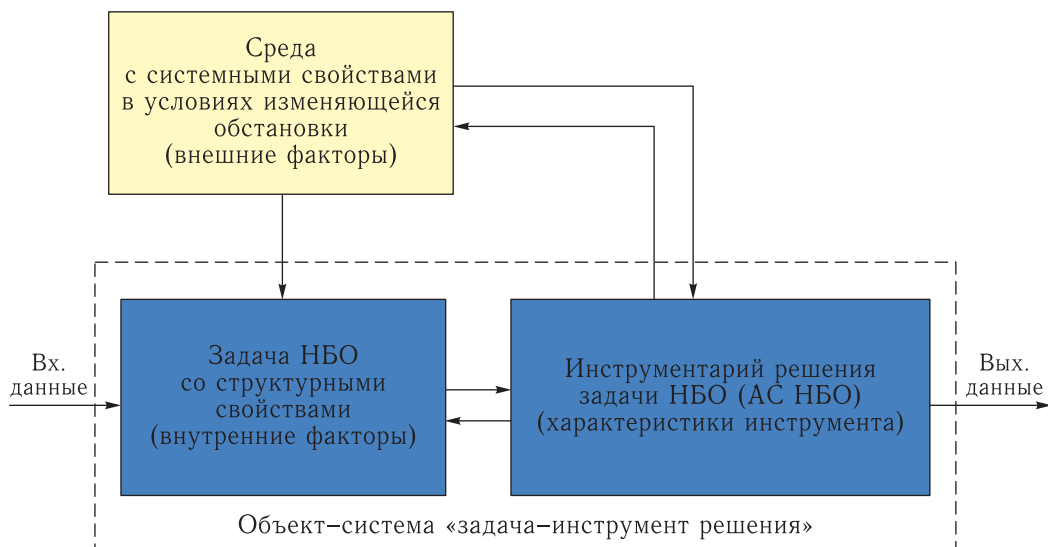


Рис. 3. Комплексное рассмотрение объект-системы «решаемая задача — инструментарий ее решения»

тельных ресурсов НБО, способного стать универсальным и машинно-независимым носителем баллистических данных и средством их обработки.

Объединение «задача НБО — инструмент решения (АС НБО)», согласно закону системности общей теории систем, как и всякий другой объект, есть объект-система (рис. 3). Объект-система «задача — инструмент решения» в рассматриваемой задаче 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.

Для успешного определения пространственно-временных характеристик космических аппаратов должна быть разработана автоматизированная система управления разрешением обобщенной некорректности задач навигационно-баллистического обеспечения.

Выявление на основе предлагаемого инструментария (матриц и обобщенных тензоров) факта

соотнесения выполняемой задачи к разряду некорректных или обобщенно некорректных (рис. 4 и 5) позволяет применить один из заранее разработанных способов их решения. Практически отмеченный факт реализации технологических операций оперативного навигационно-баллистического обеспечения 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 [7, 8].

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

Предложенная в 80–90-х годах прошлого столетия теория ультрасистем как часть математической информатики была разработана ее автором, профессором А. В. Чечкиным с учениками в применении к различным областям знаний, в том числе при создании элементов искусственного интеллекта умных систем [11, 12]. При этом подразумевается, что «...точки математических пространств известны с абсолютной точностью. Новые отображения, названные ультраотображениями, осуществляют

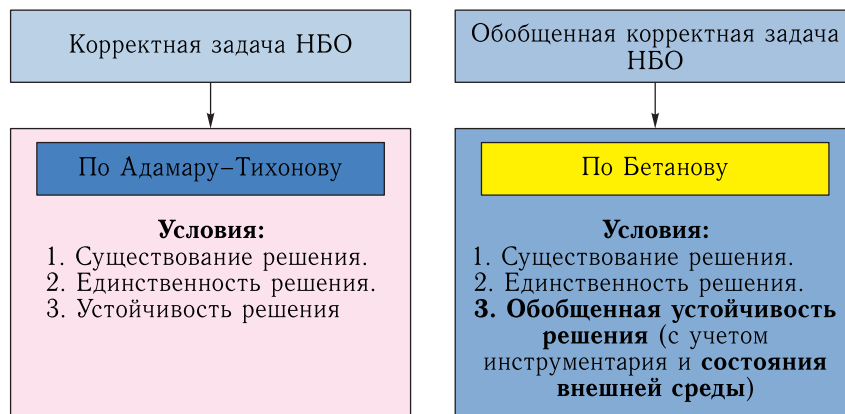


Рис. 4. Условия, обеспечивающие корректность и обобщенную корректность решения задач

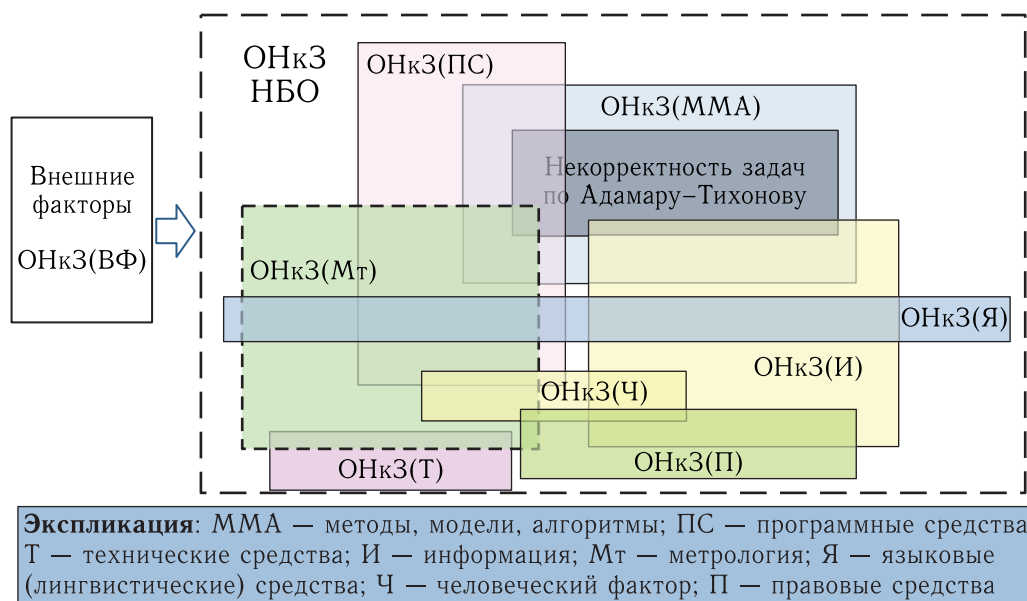


Рис. 5. «Круги» Эйлера, поясняющие понятие «обобщенная некорректная задача» навигационно-баллистического обеспечения

соответствия между информацией 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 ультраоператоров определяются различные операции и изучается их алгебра» [12].

Предлагаемые ключевые диаграммы могут быть рассмотрены как дальнейшее развитие элементов теории ультра-систем, учитывающих влияние

инструмента решения и факторов среды, действующих порознь одновременно и неодновременно.

Диаграмма, называемая коммутативной, с тремя ультраоператорами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих порознь и неодновременно, приведена на рис. 6, а коммутативная диаграмма с тремя ультраоператорами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих одновременно, — на рис. 7. На рисунках введены обозначения:

- $X$  — опорное множество точки  $x_0$ ;
- $L$  — решетка понятий для  $X$ ;

$P$  — решетка достоверностей;

$r_{xинстр}, r_{zинстр}$  — естественные проекции декартова произведения  $P \times L \times X = X^{\wedge}_{инстр}$  на последний сомножитель:

$$r_{xинстр} : X^{\wedge}_{инстр} \rightarrow X, r_{zинстр} : Z^{\wedge}_{инстр} \rightarrow Z.$$

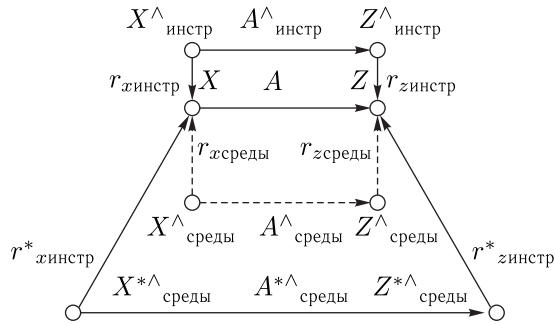


Рис. 6. Коммутативная диаграмма с тремя ультраоператорами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих порознь и одновременно

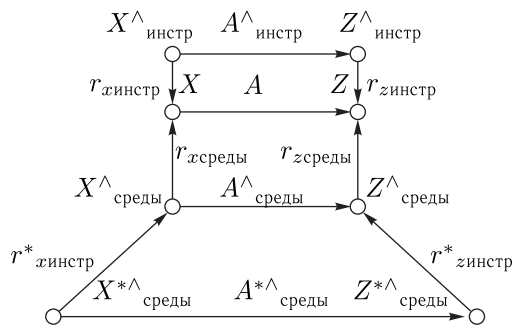


Рис. 7. Коммутативная диаграмма с тремя ультраоператорами, учитывающими влияние инструмента решения и двух факторов среды, действующих одновременно

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

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

Неполная реализация штатной схемы радиоконтроля орбиты приводит к необходимости определе-

ния параметров движения космических аппаратов по выборкам ИТНП малого объема. Анализ численных методов решения плохообусловленных систем нормальных уравнений показывает, что одним из возможных подходов с точки зрения реализации парадигмы Страхова является применение метода сопряженных градиентов (МСГ) [3]. Метод базируется на построении псевдоортогональных систем векторов на основе использования степенных последовательностей. Для улучшения качества процесса сходимости МСГ целесообразно применение операции понижения числа обусловленности (предобуславливания) матрицы СНУ.

Примером применения описываемого подхода к решению обобщенных некорректных задач при малой (недостаточной для решения в традиционных условиях) выборке измерений при выведении КА на геостационарную орбиту служат данные, приведенные на рис. 8.

На основе применения предлагаемого подхода с использованием реальных измерений текущих навигационных параметров, представляющих неполную реализацию плана определения траектории движения в различных вариантах, удается успешно решать подобного рода задачи. Подход, заключающийся в анализе прогнозируемых проблем и трудностей решения баллистических задач (технологических операций), позволяет оперативно применить заранее разработанные методики к преодолению отмеченных проблем, в том числе при отсутствии полного объема запланированной измерительной информации.

При этом используется предложенная в работе [3] обобщенная технологическая модель уточнения начальных условий движения ракет и космических аппаратов (КА), архитектура которой содержит подсистемы моделирования движения КА и вычисления расчетных аналогов измерений текущих навигационных параметров (ИТНП), определения параметров движения (ОПД) КА по ИТНП, идентификации некорректных задач ОПД и реализации сервисов НБО.

В приведенном примере в целях решения проблемы идентификации факта некорректной постановки задачи ОПД и принятия мер, связанных с парированием нештатной ситуации, разработана и применена технологическая модель «идентифи-



ОПД КА при определении параметров опорной орбиты геостационарного КА на этапе выведения

Характеристика схемы РКО				РНУ	
Номер сеанса	Номер ИП	ИТНП	$t_{\text{к}} - t_{\text{н}}$ , с	$T_{\text{др}}$	
1	33	$D$	190	$T_{\text{др}} = 1\text{ч } 28\text{м } 28\text{с}$	$a = 6586,948\text{ км}$
2	33	$D'$	190	$e = 0,0023$	$i = 51,5^\circ\ 038,5'\ 033,5''$
3	33	$D$	250	$h = 197,1\text{ км}$	
4	33	$D'$	250	$H = 226,3\text{ км}$	

Отклонения параметров уточненной орбиты от расчетной (МСГ)

Состав сеансов выборки ИТНП	Отклонения параметров уточненной орбиты от расчетной					
	$dT_{\text{др}}$ , сек	$da$ , км	$de$ , -	$di$ , угл. с	$dh$ , км	$dH$ , км
1, 2, 3, 4	1,169	0,955	-0,00010	17	2,664	1,909
1, 2	-0,469	-0,390	-0,00016	-9	1,444	-0,287
1	0,250	0,205	-0,00007	23	0,055	0,952
2	-0,501	-0,416	-0,00018	-9	1,524	-0,356
3, 4	0,755	0,611	-0,00010	73	2,212	1,392
3	-0,429	-0,363	-0,00014	81	1,291	-0,165
4	-0,595	-0,502	-0,00021	82	1,603	-0,618

здесь  $T_{\text{др}}$  — драконический период,  $a$  — большая полуось,  $e$  — эксцентриситет,  $i$  — наклонение орбиты,  $h$ ,  $H$  — минимальная и максимальная высота орбиты

Рис. 8. Результаты экспериментальной проверки варианта уточнения параметров орбиты

кации некорректных задач по ИТНП, включающая реализацию следующих основных функций:

- формализованного представления параметрического описания некорректности;
- выявления некорректностей и их идентификации;
- ведения базы данных формализованных представлений некорректностей;
- актуализации базы формализованных описаний некорректностей» [3].

В процессе совершенствования описанного подхода предусмотрено использование обобщенных структурных свойств измерительных задач, предложенных авторами в работе [10]. В частности, характеристика «обобщенной наблюдаемости», расширяющая введенное Р. Калманом понятие «наблюдаемости» динамической системы и далее

модифицированное для решения локальных нелинейных задач [17], позволяет оценить заранее до проведения реального технологического цикла НБО возможность потенциального определения уточняемых параметров в условиях штатных и нештатных ситуаций с учетом инструментария решения задачи в условиях реальных внешних условий.

## Заключение

В статье 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.

Указанное обеспечивает моделирование и создание интеллектуальных систем (экспертных и обучающих комплексов, расчетно-логических систем, использующих вычислительные алгоритмы и т.п.) 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.

## Список литературы

1. *Бетанов В.В.* Матрицы и тензоры представления проблем решения задач навигационно-баллистического обеспечения управления КА. Тезисы доклада на XLVI Академических чтениях по космонавтике РАН, январь 2022, с. 42.
2. *Тюлин А.Е., Бетанов В.В.* Новые подходы к оценке проблем решения задач навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами // Правовая информатика, М.: «ИТМ и ВТ РАН», 2022, № 1.
3. *Байрамов К.Р., Бетанов В.В., Ступак Г.Г., Урличич Ю.М.* Управление космическими объектами. Методы, модели и алгоритмы решения некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения. М.: Изд-во ОАО «Радиотехника», 2012. 360 с.
4. *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.
5. *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.: Инновационное машиностроение, 2020. 336 с.
6. *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. А.Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 302 с.
7. *Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Кобзарь А.А.* Навигационно-баллистического обеспечения полета ракетно-космических средств. Книга 1. Методы, модели и алгоритмы оценивания параметров движения. М.: Радиотехника, 2018. 479 с.
8. *Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Юрасов В.С., Стрельников С.В.* Навигационно-баллистического обеспечения полета ракетно-космических средств. Книга 2. Системный анализ НБО. М.: Радиотехника, 2018. 487 с.
9. *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.
10. *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.
11. *Потюпкин А.Ю., Чечкин А.В.* Искусственный интеллект на базе информационно-системной избыточности. М.: КУРС, 2019. 384 с.
12. *Чечкин А.В.* Математическая информатика. М.: Наука, 1991. 412 с.
13. *Вильчевская Е.Н.* Тензорная алгебра и тензорный анализ: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2012. 4 с.
14. *Пальмов В.А.* Элементы тензорной алгебры и тензорного анализа: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2008. 108 с.
15. *Димитриенко Ю.И.* Тензорное исчисление М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
16. *Векуа И.Н.* Основы тензорного анализа и теории ковариантов. М.: Наука, 1978. 296 с.
17. *Разоренов Г.Н.* Введение в теорию оценивания состояния динамических систем по результатам измерений: Учеб. пособие. М.: МО СССР, 1981. 272 с.