

К вопросу повышения устойчивости решения обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения на различных этапах полета КА

© А. Е. Тюлин, В. В. Бетанов

АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

Предлагается концепция повышения устойчивости решения некорректных задач определения движения на различных этапах полета КА на основе предобусловленного метода сопряженных градиентов с использованием параметрического подхода. На примере определения параметров движения КА на этапе выведения на орбиту показана возможность обеспечения требуемых точностных характеристик в условиях неполной реализации запланированной схемы контроля орбиты и в условиях штатной схемы контроля орбиты на короткой мерной базе.

Ключевые слова: навигационно-баллистическое обеспечение, некорректная задача, обобщенно некорректная задача (ОНкЗ), космический аппарат.

Определение вектора состояния ИСЗ осуществляется путем статистической обработки совокупности измерений текущих навигационных параметров (ИТНП), которые получают в результате проведения радиоконтроля орбиты (РКО). Как правило, штатная технология РКО предполагает получение ИТНП движения ИСЗ с нескольких измерительных пунктов в рамках типовой циклограммы. При возникновении нештатных ситуаций может иметь место неполная реализация штатной схемы РКО. В предельном случае вектор ИТНП может быть сформирован в объеме одного сеанса РКО при одном прохождении ИСЗ в зоне радиовидимости измерительного пункта.

С точки зрения вычислительной математики рассматриваемая задача навигационно-баллистического обеспечения (НБО) относится к классу некорректных.

Причины, приводящие к возникновению нештатных ситуаций и их виды приведены в таблице.

Виды нештатных ситуаций и их причины

Виды нештатных ситуаций	Причины, приводящие к нештатным ситуациям
Ограниченный объем выборки измерений (ИТНП) при оперативном определении параметров движения КА, обусловленный срывом штатной схемы реализации циклограммы проведения радиоконтроля (РКО)	<ul style="list-style-type: none"> — 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.
Ограничение выборки ИТНП, обусловленное нештатными ситуациями, в рамках которых имело место реализация штатной схемы РКО, но выборка содержит сеансы ИТНП, которые не могут быть использованы для решения задачи оперативного определения параметров движения	<ul style="list-style-type: none"> — Искажения при передаче сеансов РКО с измерительной станции в центр сбора ИТНП; — влияний радиотехнических и геофизических помех; — отклонений технологических параметров измерительных средств от номинала (бортовые фазовые задержки, калибровочные дальности пр.); — радиоэлектронного противодействия.
Несоответствие расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному. Значение начального вектора состояния q_0 не обеспечивает требуемые результаты с использованием штатных процедур определения параметров движения КА по ИТНП.	<ul style="list-style-type: none"> — После выведения КА с помощью ракеты-носителя на орбиту при отклонениях параметров орбиты выведения от номинальных; — отклонениями параметров орбиты от номинальных при проведении динамических операций связанных с коррекцией орбиты КА; — ошибками прогнозирования движения КА, обусловленными неадекватностью математической модели движения.

В качестве инструментария в этом случае выступает автоматизированная система (АС) НБО, способная деформировать решение задачи в соответствии с видами обеспечения: математическим, техническим, программным, организационным и другими. Согласно закону системности общей теории систем, объединение «задача НБО — инструмент решения (АС НБО)» (ЗИ), как и всякий другой объект, есть объект-система.

При этом объект-система ЗИ НБО (рис. 1) рассматривается как целенаправленная иерархическая большая интегрированная система, представляю-

щая 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.



Рис. 1. Объект-система задач НБО с внешней «инфраструктурой»

С совершенствованием инструмента решения задач НБО появляется возможность решать усложняющиеся задачи определения параметров движения, осуществлять стандартизацию и унификацию, производить идентификацию и адаптацию. Вместе с тем, усложнение инструментария, требующее «человеко-машинной» 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 связки «ЗАДАЧА — ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ» как ОБЪЕКТ-СИСТЕМЫ.

Соотношение понятий некорректная и обобщенно некорректная задачи может быть продемонстрировано диаграммой Эйлера на рис. 2. На нем в круглых скобках указывается информация о том, за счет каких факторов

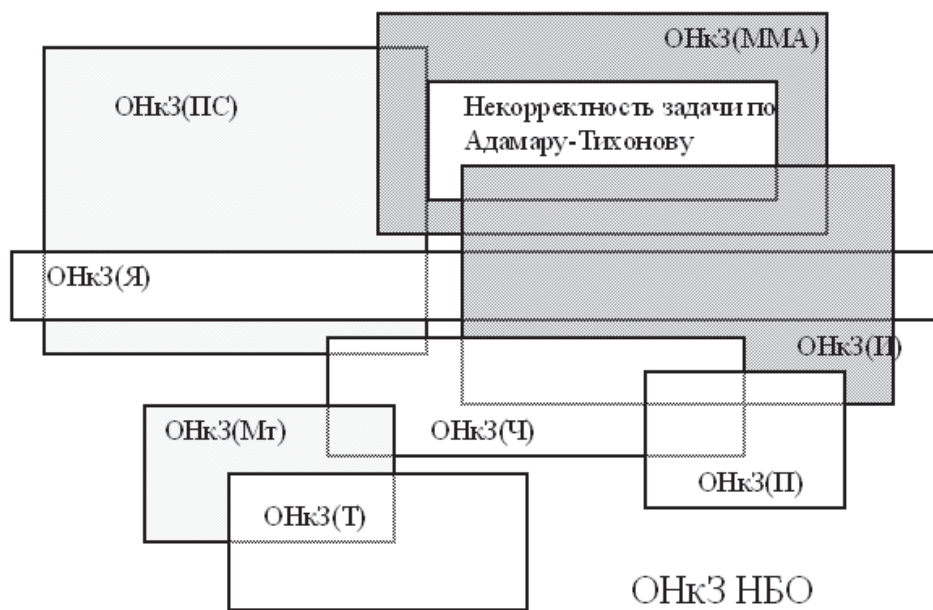


Рис. 2. Диаграмма Эйлера для обобщенных некорректных задач

возникает обобщенная некорректность задачи (ОНкЗ) НБО, а именно: ММА — методов, моделей, алгоритмов (математического обеспечения инструментария — автоматизированной системы навигационно-баллистического обеспечения); ПС — программных средств; Я — лингвистического фактора (языковых средств); И — информационного обеспечения; Ч — эргатического фактора (человека), административной составляющей; Т — технических средств; П — правового обеспечения; Мт — метрологического обеспечения.

Изучению влияния различных факторов (суть видов обеспечения) автоматизированных систем переработки информации и управления (АС НБО и АСУ КА) на конечный результат функционирования объектов посвящено значительное число работ. Простое их перечисление заняло бы достаточно большое место. Здесь лишь отметим, что влияние различных видов обеспечения автоматизированной системы, как инструментария, вносящего одновременно соответствующие деформации в решение задачи, изучено в неравной мере:

- более глубоко и фундаментально — математическое, информационное;
- достаточно детально — программное и отдельные аспекты технического;
- менее основательно — метрологическое (в настоящее время только формируются основы системной метрологии), лингвистическое и правовое;
- еще менее изучено влияние организационного обеспечения (например, различных моделей поведения оператора-баллистика в процессе выпол-

нения технологического цикла НБО, «заложенных» в базу баллистических знаний) на результаты расчетов.

Требует значительных интеллектуальных усилий осмысление функционирования объект-системы «задача НБО-инструмент решения (АС НБО)» в условиях изменяющейся среды, например, целей расчетов, требований к процессу функционирования АС НБО и т. д. Само поведение объект-системы во времени и в пространстве в окружении других объектов оказывается изменяющимся детерминировано или стохастически.

Вместе с тем, исследование комплексного рассмотрения влияния максимального числа факторов-видов на конечный результат расчетов в известной литературе, по существу, отсутствует. Главная трудность здесь, по-видимому, заключается в том, что «декомпозиционное» рассмотрение влияния отдельных факторов в условиях больших систем требует специфических математических методов, моделей, алгоритмов, а также в каждом случае особых приемов, подходов, описаний и пр. До последнего времени отсутствовал удовлетворительный математический аппарат, который позволял бы с единых позиций описать влияние каждого фактора-вида на конечный результат с достаточной мерой глубины (например, влияния отказов в функционировании аппаратуры и действий оператора-баллистика того или иного уровня организационной системы АС НБО при проведении расчетов).

Разработанная профессором А. В. Чечкиным [1, 6] общая теория ультраоператоров в значительной мере удовлетворяет требованиям исследования вышеназванных вопросов, т. к. 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 ультраотображениями, осуществляют 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, названная теорией ультрасистем, позволяет по отдельным сведениям о точке прообраза получать отдельные сведения о точке образа. На множестве ультраоператоров определяются различные операции, и изучается их алгебра.

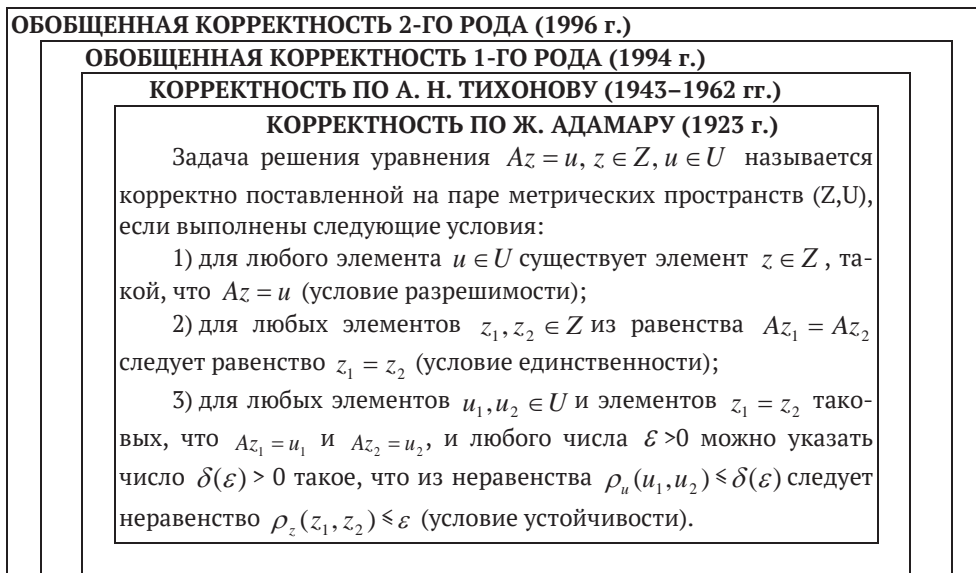
Применение ультраоператоров и ультрасистем позволяет продуктивно описывать в том числе обобщенные структурные характеристики измерительных задач, а именно: обобщенную наблюдаемость, обобщенную управляемость, обобщенную идентифицируемость и т. д. на образе объект-системы (а не только в ее математическом проявлении при постановке и решении задачи).

Так, под обобщенной наблюдаемостью измерительной задачи в объект-системе может пониматься наблюдаемость задачи определения параметров движения (ОПД) сложного динамического объекта (СДО) не только за счет

«классических» математических ее аспектов (соответствующего ранга матрицы наблюдаемости и вариантов решения в плохообусловленном случае), но также в расширенной математической трактовке (приведения нелинейной задачи путем линеаризации к линейному варианту и пр.) и учета влияния других видов обеспечения инструментария (недостаточности данных, наблюдаемости в условиях шумов измерений различного рода, в т. ч. аномального характера, преднамеренной замены измерений другими данными и пр.).

При новом подходе использование информационной производной позволяет ввести критерий обобщенной наблюдаемости объектов, в т. ч. и самой объект-системы в целом. Последнее особенно важно при выявлении и анализе причин аварийных и нештатных ситуаций при летных испытаниях и ОПД СДО. Например, причиной неверных действий оператора радиотехнического измерительного комплекса может оказаться не отсутствие необходимого объема освоенных им навыков действий в тех или иных ситуациях, а неверно составленная инструкция действий номера расчета в сложившейся ситуации или неэргономичность спроектированной панели автоматизированного рабочего места и т. д. Прежде всего в подобных задачах для верного поиска причин аварийной ситуации выясняется, какие виды обеспечения рассматриваемой объект-системы обобщенно наблюдаемы. При определении обобщенной ненаблюдаемости вносятся коррективы для выявления ненаблюдаемых элементов косвенно через дополнительные данные.

Дальнейшее совершенствование теории ультраоператоров и ультрасистем позволит не только расширить структурные понятия и свойства измерительных задач, но и в перспективе осуществлять полную обработку данных в модели объект-системы (рис. 3):



Пусть в пространстве Z выделено некоторое множество $M \subset Z$.
 Задача решения уравнения $Az = u$ называется корректной по А. Н. Тихонову, если:

- 1) априори известно, что решение задачи существует и принадлежит M ;
- 2) решение единственно на множестве M ;
- 3) для любых $z_1, z_2 \in M$ и любого числа $\varepsilon > 0$ существует $\delta(\varepsilon) > 0$ такое, что из равенства $\rho_u(Az_1, Az_2) < \delta(\varepsilon)$ следует неравенство $\rho_z(z_1, z_2) \leq \varepsilon$, т. е. оператор A^{-1} непрерывен на образе множества M . Тогда множество M — множество корректности (оно должно быть компактом).

Задача называется обобщенно корректной 1-го рода, если:

- 1) априори известно, что решение задачи как объект-системы (т. е. решение задачи с учетом инструментария его решения) существует и принадлежит M° ;
- 2) решение единственно на множестве M° ;
- 3) для любых $z_1^\circ, z_2^\circ \in M^\circ$ и любого числа $\varepsilon^\circ > 0$ существует $\delta^\circ(\varepsilon^\circ) > 0$ такое, что из неравенства $\rho_u(Az_1^\circ, Az_2^\circ) < \delta^\circ(\varepsilon^\circ)$ следует неравенство $\rho_z(z_1^\circ, z_2^\circ) \leq \varepsilon^\circ$, т. е. оператор A^{-1} непрерывен на образе множества M° . Множество M° при этом называют множеством обобщенной корректности.

При этом величина $\rho_u(Az_1^\circ, Az_2^\circ)$ рассматривается как результат влияния совокупности погрешностей $\Delta_s : \Delta_s = \sum \Delta_i; i = 1, N$, где N определяется количеством факторов, деформирующих решение (для автоматизированных систем в соответствии с видами обеспечения принимается $N = 8$).

ОБОБЩЕННАЯ КОРРЕКТНОСТЬ 2-ГО РОДА (1996 г.)

Задача называется обобщенно корректной 2-го рода, если:

- 1) выполняются требования обобщенной корректности 1-го рода;
- 2) решение и процесс его получения должен удовлетворять допустимым ограничениям вида:

$$(V_i) \leq (V_{i \text{ доп}}); t_{\text{реш}} \leq t_{\text{доп}}.$$

Здесь V_i — компоненты вектора, характеризующего качество полученного решения, а параметр $t_{\text{доп}}$ задает временные ограничения.

Рис. 3. Развитие определений корректности (некорректности) задачи измерительная задача — автоматизированная система ее решения

Связь между понятиями обобщенная некорректная задача и «обыкновенная» некорректная задача становится очевидной при интерпретации обобщенной некорректной задачи как некорректной задачи (в смысле Тихонова), рассматриваемой вместе с ее «предысторией» и средой, в которой она реализуется (рис. 4).

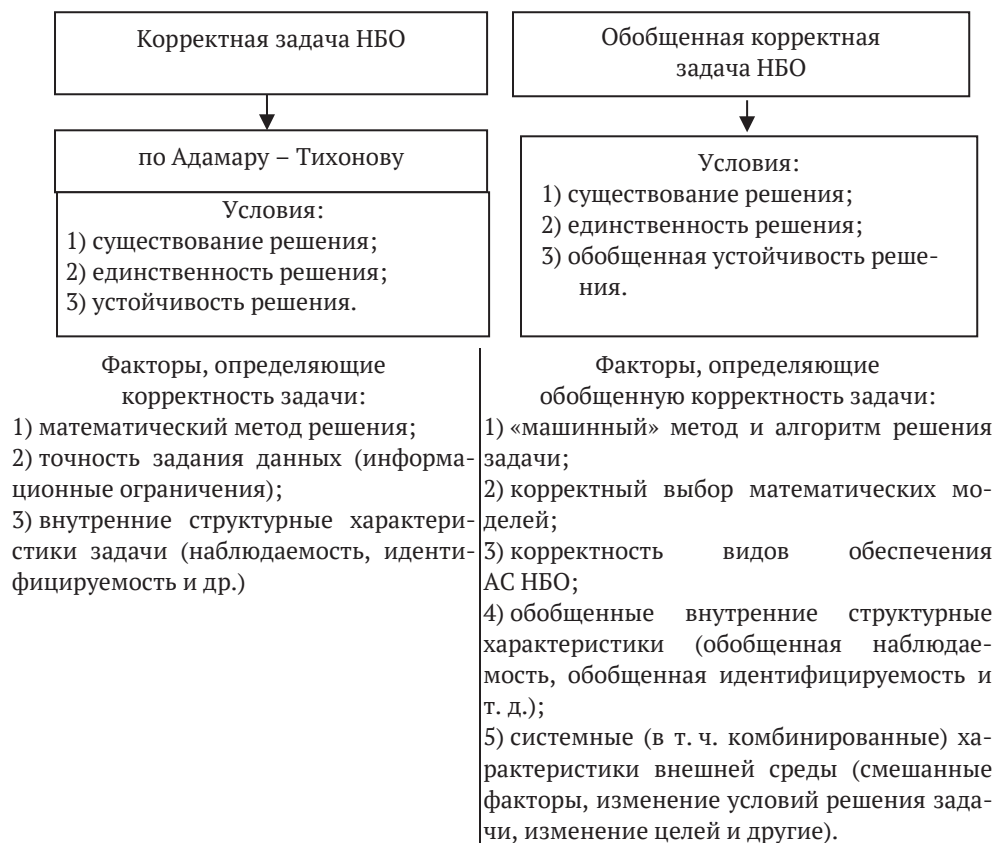


Рис. 4. Условия корректности и обобщенной корректности задач НБО и их определяющие факторы

Управление решением обобщенных некорректных задач в технологическом цикле НБО

Для успешного определения пространственно-временных характеристик КА должна быть разработана автоматизированная система управления разрешением обобщенной некорректности задач НБО. Общая схема управления решением ОНкЗ в технологическом цикле определения параметров движения КА, включающая этапы выявления некорректностей, распознавания образа (причины), ранжирование некорректностей, а также преобразование (редуцирование) и решение задачи НБО, представлена на рис. 5.

Центральным элементом рассматриваемой системы управления решением обобщенных некорректных задач является, безусловно, является блок преобразования (редуцирования) задачи НБО.

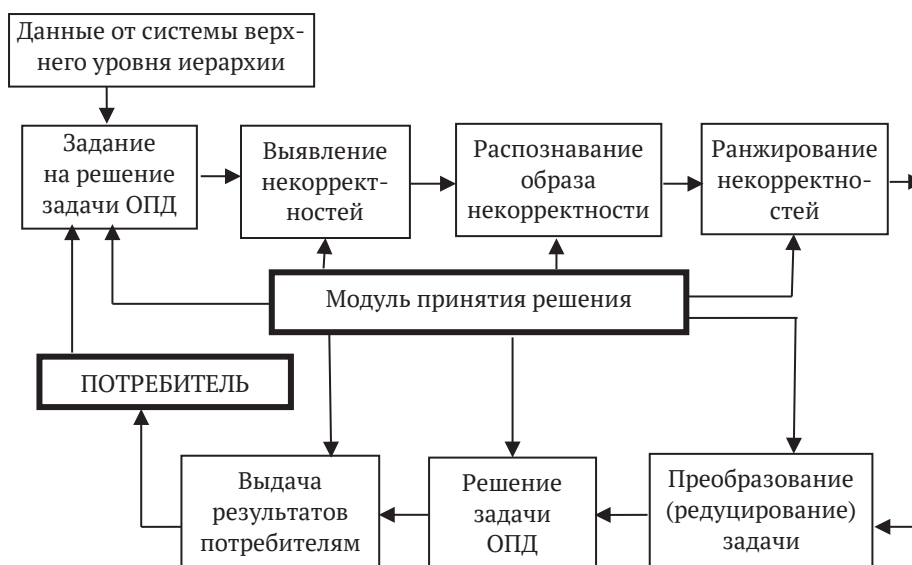


Рис. 5. Система управления решением ОНкЗ в технологическом цикле НБО

Для выборок измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) ограниченного объема характерным является информационная необеспеченность определяемого вектора состояния (ВС) космического объекта, проявляющаяся в плохой обусловленности решаемой задачи определения движения по результатам измерений [1, 2]. Понятие плохой обусловленности в основном отражает качественную сторону задачи определения ВС в условиях плохой наблюдаемости, связанную с возможными значительными ошибками в решении системы нормальных уравнений (СНУ). Значения чисел обусловленности в подобного рода ситуациях могут быть настолько велики, что при фиксированных уровнях ошибок входных данных СНУ и разрядной сетки ЭВМ для них нельзя гарантировать в решении требуемой точности.

Подобная практика связана с необходимостью решения так называемых некорректных и обобщенно некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения [3, 4].

Анализ типовых подходов к решению плохообусловленных задач определения параметров движения КА показывает, что проблемные вопросы определения ВС в условиях плохонаблюдаемых выборок ИТНП требуют дальнейших исследований и разработок как методического, так и программно-алгоритмического характера. Метод решения задачи определения ВС КА должен обладать свойством несингулярности и, в то же время, свойством достаточно высокой достоверности решений, обеспечивающих приемлемую невязку.

Результаты обработки проведенных натурных экспериментов показали, что в состав вектора характеристик параметрического семейства идентификации некорректных задач целесообразно включать:

- числа обусловленности формируемой матрицы СНУ;
- статистические характеристики сеансов ИТНП (СКО относительно среднеопытной орбиты, СКО относительно аппроксимирующего полинома, систематическую составляющую отклонений ИТНП каждого сеанса);
- поправки в уточненные параметры орбиты;
- результаты апостериорной оценки уточненных компонент вектора состояния в виде диагональных элементов ковариационной матрицы.

В основу концепции построения процедуры вычисления вектора решения СНУ с повышенной устойчивостью целесообразно положить следующее:

- отсутствие каких либо ограничений на исходную систему (она может быть как хорошо, так и плохо обусловленной);
- ранг матрицы системы может быть произвольным;
- оценка точности может зависеть от свойств системы, обнаруживаемых по ходу процесса определения ВС и от некоторой информации, привлекаемой дополнительно.

Анализ методов решения задач оптимизации и решения систем линейных алгебраических уравнений показывает, что построение ортогональных (псевдоортогональных и т. п.) систем векторов, особенно на основе использования степенных последовательностей, является базой для реализации различных численных методов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), в том числе и класса методов, получивших название методов сопряженных направлений.

Метод сопряженных градиентов (МСГ) представляет собой итерационную вычислительную процедуру и базируется на построении псевдоортогональных систем векторов на основе использования степенных последовательностей. Вектор решения, получаемый с применением МСГ, минимизирует соответствующий функционал ошибки [3].

Результаты численного исследования показывают, что в целях получения более точного и достоверного решения, следует принимать меры к тому, чтобы матрица СНУ была как можно более «хорошо» обусловлена. Однако, в условиях ограничений на процесс проведения ИТНП повысить обусловленность СНУ за счет изменения программы определения орбиты не всегда представляется возможным. Для уменьшения негативного влияния плохой обусловленности в условиях выборок ИТНП ограниченного объема целесообразно использование метода сопряженных градиентов с применением предобуславливания [4, 5] матрицы исходной СНУ посредством преобразования конгруэнтности.

Предлагаемая методика и алгоритм определения параметров движения КА на основе предобусловленного метода сопряженных градиентов с использованием параметрического подхода позволяет повысить точность определе-

ния параметров движения КА в условиях ограничений на процесс реализации ИТНП. Исследование свойств оценок, получаемых с использованием указанной методики, показывает, что их оптимальность достигается:

- применением процедуры предобуславливания;
- реализацией процедуры идентификации принадлежности решаемой задачи к классу некорректных и априорной оценкой точности получаемых решений в зависимости от значений погрешностей ИТНП;
- определением на множестве возможных решений класса корректности и выбора оптимального решения из данного класса;
- рациональным построением вычислительного процесса с применением приема Айзенштата.

Результаты определений параметров движения КА на этапе выведения на орбиту показывают 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

Полученные экспериментальные результаты, показывают, что предложенный подход позволяет обеспечить определение движения КА по выборке ИТНП в объеме 20–30 % от штатной с точностью, удовлетворяющей требованиям управления ряда типов КА (например, метеорологических), а его применение в практике оперативного навигационно-баллистического обеспечения позволяет в целом обеспечить надежность управления КА в нештатных ситуациях.

Применение рассмотренного подхода с учетом различных вариантов использования изделий позволяет в значительной степени улучшить качество проектирования и применения программно-математических комплексов НБО и создания продуктов с новыми потребительскими свойствами и абсолютным качеством.

Литература

1. Тюлин А. Е., Бетанов В. В. Летные испытания космических объектов. Определение и анализ движения по экспериментальным данным. Под ред. А. Е. Тюлина. — М.: «Радиотехника», 2016. — 332 с.
2. Тихонов А. Н., Гончарский А. В. и др. Численные методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1990. — 232 с.
3. Марчук Г. И., Кузнецов Ю. А. Итерационные методы и квадратичные функционалы. — Новосибирск: Наука, 1992. — 175 с.
4. Бетанов В. В., Кудряшов М. И. Практические подходы к решению некорректных задач с приложениями к навигационно-баллистическому обеспечению управления КА. — М.: РВСН, 1997. — 132 с.
5. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. — М.: Мир, 1991. — 367 с.
6. Чечкин А. В. Математическая информатика. — М.: Наука, 1991. — 416 с.

Higher Stability of the Generalized Ill-posed Problem Solutions for the Navigation and Ballistic Support at Various Stages of a Spacecraft's Flight

A. E. Tyulin, V. V. Betanov

We propose a way to increase stability of the solutions in cases of ill-posed problems when a spacecraft's motion parameters are determined at different stages of its flight. Our concept is based on the preconditioned conjugate gradient method and uses the parametric approach. An example of the process to determine the motion parameters is made for a space vehicle launched to the orbit. It shows a possibility to provide the required accuracy characteristics in conditions of incomplete implementation of the planned orbit control scheme and in the conditions of the standard orbit control scheme on a short measuring base.

Key words: navigation and ballistic support, ill-posed problem, generalized ill-posed problem, space vehicle.