

Обобщение структурных свойств наблюдаемости и идентификации в задачах навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами

© В.В. Бетанов¹, В.В. Корянов²

¹АО «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрено применение введенных оригинальных свойств измерительных задач в практике навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления космическими аппаратами (КА). На основе представления математических моделей динамической и измерительной систем, а также при неопределенности рассматриваемых величин дана классификация измерительных задач. Приведены методы статистического и конъюгентного анализа параметрической идентификации сложных динамических объектов, являющихся частными случаями такого структурного свойства, как наблюдаемость. Дана классическая математическая постановка измерительной задачи. Показано, что традиционное исследование характеристических свойств подобных задач для нештатных ситуаций недостаточно, поскольку задача технологического цикла НБО по определению параметров движения КА должна быть представлена как объект-система задача — инструмент решения. Подобные задачи предлагается характеризовать обобщенными структурными свойствами. Описан вариант применения обобщенных наблюдаемости и идентификации к практическим задачам НБО управления КА. Предложен алгоритм проверки обобщенной наблюдаемости и идентификации в измерительных задачах. Отмечена эффективность применения аппарата теории ультраоператоров и ультрасистем для исследования подобных задач с использованием информационной производной.

Ключевые слова: измерительная задача, структурные свойства измерительных задач, наблюдаемость, идентифицируемость, обобщенные свойства измерительных задач, навигационно-баллистическое обеспечение, космический аппарат

Введение. Структура любой системы определяется совокупностью либо главных системообразующих связей и отношений, либо типических свойств. Это означает, что внутренние связи и отношения (адекватности математической модели, наблюдаемости определяемых параметров, качества оценок, связи между моделями динамической и измерительной систем $G — S$) одновременно могут рассматриваться и как типические, структурные свойства измерительных задач.

Одно из необходимых условий правильности получаемого решения — адекватность математических моделей, используемых при решении измерительных задач, процессам функционирования реальных физических объектов. В принципе на этапе постановки измерительной задачи проверка на адекватность должны подвергаться следующие пары [1–6]:

$$\mathbf{G}^* — \mathbf{G}; \quad \mathbf{S}^* — \mathbf{S}; \quad \mathbf{Q}^* — \mathbf{Q}.$$

Отметим, что процесс функционирования динамической системы должен быть близок к реальному движению космических аппаратов (КА), уравнения измерений должны достаточно точно описывать способ преобразования траекторной информации в измеряемые параметры при абсолютной точности их получения, свойства ошибок измерений должны соответствовать реальным условиям проведения измерительного эксперимента. Однако на практике одновременно проверить все перечисленные условия невозможно, так как в качестве исходных данных со стороны «сверхсистемы» участвует реальная выборка результатов измерений \bar{Z}^* , представленная единственной реализацией (выборочной совокупностью), а со стороны системы процесса измерений $\bar{y}(t)$ используются модельные выборки \bar{z} (число которых теоретически не ограничено). Если каждая модельная выборка, получаемая с помощью ЭВМ, может быть разложена на составляющие, обусловленные детерминированным и стохастическим процессами функционирования измерительной системы, то реальная выборка формируется под действием многих возмущающих факторов случайного и неслучайного характера. Она принципиально неразложима на составляющие: нельзя однозначно определить неизвестные слагаемые какого-либо числа, даже если известны и сумма, и число этих слагаемых.

Поэтому по реальной выборке \bar{Z}^* проверяют адекватность либо математической модели (ММ) динамической системы (ДС) $\mathbf{G}^* — \mathbf{G}$, либо ММ измерительной системы (ИС) $\mathbf{S}^* — \mathbf{S}$, либо ММ ошибок измерений $\mathbf{Q}^* — \mathbf{Q}$, либо, чаще всего, адекватность всей совокупности моделей. Если выполняют первую проверку, то делается предположение о том, что уравнения измерений \mathbf{S} и условия опыта \mathbf{Q} достаточно точно описывают реальный процесс измерений. Кроме того, проверку адекватности $\mathbf{G}^* — \mathbf{G}$ принято проводить при отсутствии шума модели, т. е. для детерминированных динамических систем.

При исследовании сложных и больших систем, к которым могут быть отнесены задачи навигационно-баллистического обеспечения

(НБО) управления КА, недостаточно рассматривать принципиальную возможность (или невозможность) определения параметров движения объекта либо его математической модели только в математическом аспекте исследуемой задачи или при задании исходных данных. Необходимо рассматривать ее в объект-системе задача НБО — инструмент решения. В качестве инструмента решения выступает автоматизированная система навигационно-баллистического обеспечения со своими подсистемами математического, программного, информационного, технического, организационного, метрологического, лингвистического и правового обеспечения. Подобные подсистемы позволяют обеспечить решение более сложных, в том числе интеллектуальных, задач, но каждая из них вносит свои дополнительные деформации в решение. В целом появляется постановка обобщенной измерительной задачи, которую целесообразно характеризовать обобщенными структурными свойствами. *Цель работы* — введение обобщенных свойств наблюдаемости и идентифицируемости подобных задач и рассмотрение возможных подходов к их использованию на практике.

Исследование характеристических свойств измерительных задач. Остановимся на классическом понятии *наблюдаемости* (см. например, работы [7–15]). С математической точки зрения наблюдаемость пары $\mathbf{G} — \mathbf{S}$ означает существование взаимно-однозначного соответствия между элементами множества начальных условий (НУ) X_0 и множества значений измеряемых сигналов (параметров) Y , т. е. отображение $E : X_0 \rightarrow Y$.

В настоящее время введено несколько понятий наблюдаемости и ненаблюдаемости [2–5, 7], прикладная значимость которых применительно к задачам экспериментальной баллистики состоит также и в том, что если установлено, что пара $\mathbf{G} — \mathbf{S}$:

1) локально наблюдаема в точке $\vec{x}_0 \in X_0$, то на практике это будет означать принципиальную возможность *однозначного восстановления возмущенной траектории движения* летательного аппарата по результатам измерений для выбранной совокупности измеряемых параметров при условии малого отклонения возмущенной траектории от расчетной номинальной;

2) глобально ненаблюдаема в области X_0 , то это означает принципиальную невозможность при точности измерительных средств, какой бы высокой она ни была, достоверно экспериментально определить фактическую траекторию полета. В этой ситуации необходимо либо изменить или расширить состав измеряемых параметров, либо привлечь дополнительную информацию.

Подобные рассуждения могут быть продолжены и для других структурных свойств измерительных задач, в частности, идентифицируемости, управляемости, декомпозируемости и т. д.

Под **идентификацией** в широком смысле понимается получение или уточнение по экспериментальным данным модели реального объекта (процесса), выраженной в тех или иных терминах (описанной на том или ином языке). Получение или уточнение по экспериментальным данным модели рассматриваемого объекта, работоспособной для всех эксплуатационных режимов, называется *идентификацией объекта*. При рассмотрении одного режима (процесса) функционирования объекта получение или уточнение на основе экспериментов модели данного режима именуется *идентификацией процесса (режима)*.

В абстрактно-теоретическом рассмотрении понятие **идентифицируемость**, по крайней мере параметрическая, является частным случаем *наблюдаемости* [5, 6]. Однако при практическом применении идентифицируемость считают важным и специфическим свойством, которое выделяют в специальную категорию. Параметрическая идентифицируемость предоставляет возможность определять параметры ММ системы или процесса по результатам измерения определенных выходных величин в течение установленного интервала времени. В рассматриваемой здесь задаче параметры, вектор которых обозначен через α , отличаются от параметра координат (вектора \vec{x}) скоростью изменения. Параметры, как правило, считаются медленно изменяющимися величинами, а в идеальном случае — постоянными ($\alpha' = 0$).

Яркий пример решения подобных задач — уточнение баллистического коэффициента (или коэффициента светового давления) при управлении КА ряда типов в технологическом цикле НБО. В указанных условиях этот коэффициент является согласующим коэффициентом «неточного знания» математической модели движения (ММД) КА, или коэффициентом целенаправленного неучета в ММД КА отдельных составляющих спектра возмущающих факторов.

Классифицировать задачи идентификации можно по ряду признаков:

- по идентифицируемому объекту или процессу;
- классу модели, в терминах которой выполняется идентификация;
- условиям наблюдения и возбуждающим процесс воздействиям и др. [11].

Теоретически рассматриваются две модели идентификации: модель, описывающая идентифицируемый процесс, и модель, в терминах которой проводится идентификация. Эти модели по своей форме (классу) могут как совпадать, так и не совпадать. Последнее имеет место, в частности, в случае когда для упрощения алгоритма идентификации (или использования ее результатов) модель, в терминах которой она выполняется, выбирается более простая, чем модель идентифицируемого процесса.

Внутренние связи и отношения любой сложной системы (а именно отношения адекватности математической модели, наблюдаемости и идентифицируемости определяемых (уточняемых) параметров, качества оценок, связи между моделями динамической и измерительной систем) одновременно могут рассматриваться как типические, структурные свойства измерительных задач [12]. Классификация задач идентификации связана с классификацией измерительных задач в более общем случае.

Математические модели ДС и ИС, как правило, представляются соответственно в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{\lambda}, \bar{u}, \bar{\omega}, t); & \bar{x}_0 = \bar{x}(t_0); \\ \bar{y} = \bar{\varphi}(\bar{x}, t); & \bar{y}^* = \bar{\psi}(\bar{y}, \bar{h}), \end{cases}$$

где \bar{x} — вектор параметров состояния; $\bar{\lambda}$ — параметры модели; \bar{u} — управляющие сигналы; $\bar{\omega}$ — шум модели; \bar{y} — измеряемые параметры; \bar{y}^* — результаты измерений (измеренные параметры); \bar{h} — шум измерений.

В зависимости от неизвестных величин рассматриваются четыре измерительные задачи.

1. Определение начального состояния ДС $\hat{\bar{x}}_0$ (для детерминированных и полудетерминированных систем, когда $\bar{\omega} = \bar{0}$).
2. Определение текущего состояния ДС $\hat{\bar{x}}(t)$ (как правило, для стохастических ДС).
3. Определение постоянных параметров модели $\hat{\bar{\lambda}}$.
4. Определение (уточнение) вида (свойств) $\bar{u}(t)$, $\bar{\omega}(t)$, $\bar{f}(\cdot)$, $\bar{\varphi}(\cdot)$, $\bar{\psi}(\cdot)$, $\bar{h}(t)$.

Первую задачу принято называть задачей статистического оценивания состояния ДС, вторую — задачей динамической фильтрации, третью — задачей параметрической идентификации ДС, четвертую — задачей структурной идентификации ДС.

В классической постановке задача параметрической идентификации динамических систем [1, 3, 4] достаточно хорошо известна, структурная идентификация (СИ) этих систем означает выбор или уточнение вида их моделей на основе анализа экспериментальных данных. Задачи СИ ДС составляют целый класс задач теории динамических систем. В связи с их сложностью и неоднозначностью способов решения они до сих пор наименее хорошо разработаны.

Общая типовая математическая постановка задачи статистического оценивания и идентификации (СОИ) параметров динамической системы может быть представлена в следующем виде [15].

Дано

1) ММ ДС:

уравнение функционирования $\mathbf{G}: \dot{\vec{x}} = \vec{f}(\cdot)$;

2) ММ ИС:

а) план измерений $\mathbf{P}: \{t_i\}_1^k, \vec{y}$;

б) уравнение измерения $\mathbf{S}: \vec{y} = \vec{\Phi}(\vec{x}, t)$;

в) информация об ошибках измерений: способ комбинации ошибок измерений (аддитивный, мультипликативный или комбинированный); вероятностные свойства ошибок \mathbf{Q} : (как правило, измерения равноточны, известны ковариационные матрицы (дисперсии) и закон распределения ошибок измерений);

3) выборка результатов измерений \mathbf{Z} :

$$\vec{z} = \{\vec{y}^*(t_i)\} \text{ с учетом общей размерности } N = m k;$$

4) априорная информация об определяемых параметрах \mathbf{A} : (данные часто отсутствуют);

5) критерий оценивания \mathbf{K} : правило оптимальности оценок (выбирается исходя из конкретной решаемой задачи).

Требуется определить: оптимальное значение оценок из соотношения $\hat{\vec{x}}_0 = \arg \text{extr} \alpha(\vec{x}_0, \hat{\vec{x}}_0)$.

Показатель качества $\alpha(\vec{x}_0, \hat{\vec{x}}_0)$ должен удовлетворять требованиям соответствия реальной задаче по полноте, критичности, содержательности и вычислимости.

Задачи только параметрической идентификации динамических систем имеют такую же математическую постановку, но вместо \vec{x}_0 в них определяются параметры модели $\vec{\lambda}$.

Наиболее распространенные (ключевые) методы параметрической идентификации моделей представлены на рис. 1.

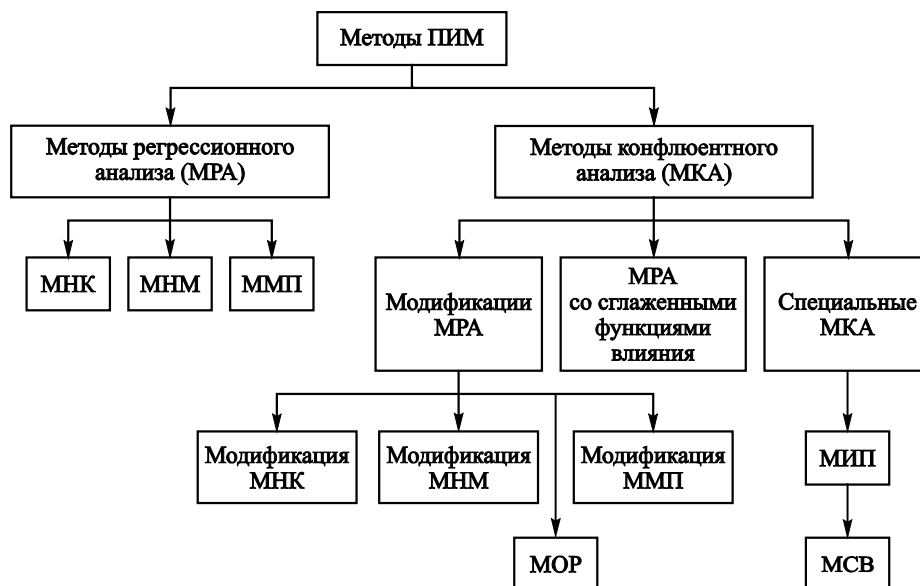


Рис. 1. Методы параметрической идентификации моделей (ПИМ):

МНК — метод наименьших квадратов; МНМ — метод наименьших модулей; ММП — метод максимума правдоподобия; МИП — метод инструментальных переменных; МСВ — метод статистик Вальда; МОР — метод ортогональной регрессии

В работе введено и рассмотрено применение в практике навигационно-баллистического обеспечения управления КА таких структурных свойств измерительных задач, как «обобщенная наблюдаемость» и «обобщенная идентификация». При этом решение измерительных задач навигационно-баллистического обеспечения рассматривается в объект-системе *задача НБО — инструмент решения (автоматизированная система НБО)* (ЗИ). Структурная схема измерительных задач с элементами обобщенных структурных свойств в объект-системе приведена на рис. 2 [1].

Разработанная профессором А.В. Чечкиным общая теория ультраоператоров [7] в значительной мере удовлетворяет требованиям исследования подобных систем, так как в ней определяются и изучаются отображения нового вида (ультраотображения с соответствующими ультраоператорами), являющиеся обобщением классических понятий математики.

Применение ультраоператоров и ультрасистем позволяет эффективно описать и обобщенные структурные характеристики измерительных задач, например обобщенную наблюдаемость и обобщенную идентифицируемость на образе объект-системы, а не только в ее математическом проявлении при постановке и решении задачи.

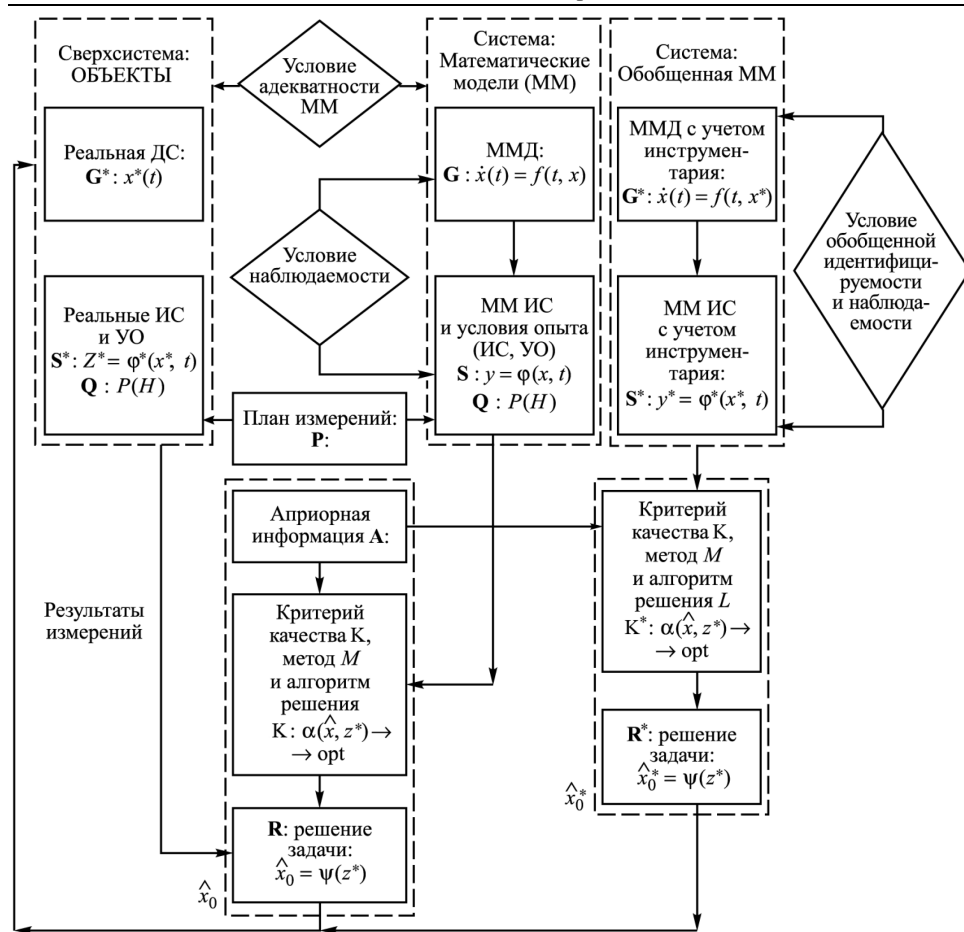


Рис. 2. Структурная схема измерительных задач с определением обобщенных структурных свойств

Далее рассмотрены перспективы использования обобщенных структурных свойств измерительных задач на реальном примере. Задача идентификации подробно исследуется, уточняется параметр ММД КА — баллистический коэффициент S_6 для КА разных типов в различных условиях (рис. 3).

Из множества способов уточнения S_6 обычно применяются следующие.

1. **Расширяется оцениваемый вектор состояния** КА посредством включения в него баллистического коэффициента S_6 ; **решается краевая задача** относительно расширенного вектора состояния. При этом одновременно с вектором параметров движения КА уточняется и баллистический коэффициент S_6 .

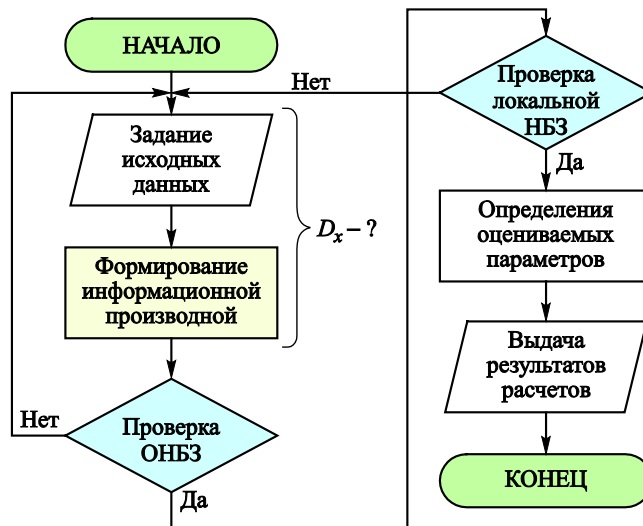


Рис. 3. Алгоритм применения проверки обобщенной наблюдаемости и идентификации в измерительных задачах:
 D_x — информационная производная ультраоператора задачи;
 ОНБЗ — обобщенная наблюдаемость задачи; НБЗ — наблюдаемость задачи

2. Решение проводится в три этапа:

1) уточняются («грубо») начальные условия (НУ) движения КА по измерениям текущих навигационных параметров (ИТНП) в традиционном варианте (без включения в вектор состояния баллистического коэффициента S_6);

2) определяется баллистический коэффициент S_6 на основе решения дополнительного скалярного уравнения (относительно, например, падения драконического периода обращения КА за интервал времени между циклами проведения технологического цикла НБО, изменения величины большой полуоси орбиты за этот же период и др.) с учетом исходных и уточненных начальных условий движения КА (например, уточненного значения баллистического коэффициента пропорционально отношению реального и прогнозируемого изменения периода обращения или по ошибке прогнозирования величины большой полуоси);

3) проводится «перерасчет» краевой задачи по ИТНП с уже уточненным баллистическим коэффициентом S_6 и определением начальных условий движения КА.

Подобные решения могут быть приняты с учетом исследования обобщенных характеристик измерительной задачи: наблюдаемости и идентифицируемости как заранее (до оперативных работ), так и в процессе выполнения технологических операций навигационно-

баллистического обеспечения управления КА. Подобные вычисления подобны задачам предварительного и оперативного планирования определения параметров орбит.

Использование предлагаемых подходов показало, что для высокоточных низкоорбитальных КА больший эффект дает второй рассмотренный способ, а для менее точных — первый. При новом подходе использование *информационной производной* позволяет ввести *критерий обобщенной наблюдаемости* объектов, в том числе и самой *объект-системы* в целом, что особенно важно при выявлении и анализе причин *аварийных и нештатных ситуаций* во время летных испытаний и эксплуатации КА. Например, причиной неверных действий оператора радиотехнического измерительного комплекса может оказаться *не отсутствие необходимого объема отработки* 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. [13, 14]. При решении подобных задач для успешного поиска причин аварийной ситуации, прежде всего, необходимо получить ответ на вопрос: *какие виды обеспечения рассматриваемой объект-системы обобщенно наблюдаемы, а какие — нет?* При определении обобщенной ненаблюдаемости косвенно, через дополнительные данные, вносятся коррективы для выявления ненаблюдаемых элементов.

Заключение. Использование на практике понятия «обобщенная идентификация», например для выбора методики оценки баллистического коэффициента, может оказаться весьма продуктивным. Очевидно, что в технологическом цикле НБО в зависимости от типа КА, выполняемых КА целевых задач, требований к точности и оперативности определения параметров движения КА, типа измерительных средств и погрешностей измерений, состояния атмосферы и других факторов используются различные методики уточнения баллистического коэффициента S_6 . Для одних КА и соответствующих ситуаций определенные способы будут эффективны, для других они могут оказаться менее эффективными или даже неработоспособными, приводящими к нештатным ситуациям.

Выбор подобных методик и решений может быть принят с учетом исследования обобщенных характеристик измерительной задачи — наблюдаемости и идентифицируемости, причем как заранее (до оперативных работ), так и в процессе выполнения технологических операций навигационно-баллистического обеспечения управления КА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бетанов В.В., Корянов В.В. Концепция обобщения структурных свойств измерительных задач при навигационно-баллистическом обеспечении космического аппарата. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 7 (700), с. 92–99.
- [2] Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Кобзарь А.А. *Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Книга 1. Методы, модели и алгоритмы оценивания параметров движения*. Монография. Москва, Радиотехника, 2018, 479 с.
- [3] Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Юрасов В.С., Стрельников С.В. *Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Книга 2. Системный анализ НБО*. Монография. Москва, Радиотехника, 2018, 487 с.
- [4] Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. *Теоретические основы баллистика-навигационного обеспечения космических полетов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 518 с.
- [5] Красовский А.А., ред. *Справочник по теории автоматического управления*. Москва, Наука, 1987, 712 с.
- [6] Разоренов Г.Н. *Введение в теорию оценивания состояния динамических систем по результатам измерений*. Москва, МО СССР, 1981, 272 с.
- [7] Чечкин А.В. *Математическая информатика*. Москва, Наука, 1991, 416 с.
- [8] 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*. Москва, Радиотехника, 2012, 360 с.
- [9] Лысенко Л.Н., Бетанов В.В. Анализ путей интеграции малых псевдостационарных геосинхронных спутников в топологию космического сегмента глобальных информационных систем. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2016, № 8–9, с. 3–20.
- [10] Степанов О.А. *Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания*. Санкт-Петербург, Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010, 509 с.
- [11] Тюлин А.Е., Бетанов В.В. К вопросу повышения устойчивости решения обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического обеспечения на различных этапах полета КА. *Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017). Тр. 7-й Всерос. конф., Санкт-Петербург, 17–21 апреля 2017*. Санкт-Петербург, ИПА РАН, с. 196–198.
- [12] Васильев Д.Г., Недогарок А.А., Бетанов В.В. Обобщение структурного понятия наблюдаемости в задачах определения параметров движения космических аппаратов. *Актуальные проблемы Российской космонавтики РАН. Тр. XXXIX Академических чтений по космонавтике, Москва, 27–30 января 2015*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 31–33.
- [13] Бетанов В.В., Ларин В.К. Использование системного подхода к решению проблемных вопросов функционирования автоматизированного комплекса программ баллистика-навигационного обеспечения полетов КА ГНСС. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2016, т. 3, вып. 1, с. 3–10.
- [14] Бетанов В.В., Ларин В.К. Концепция построения базовой технологической модели разработки баллистической структуры автоматических КА. *Ракет-*

но-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 4, с. 64–72.

- [15] Тюлин А.Е., Бетанов В.В. *Летные испытания космических объектов. Определение и анализ движения по экспериментальным данным*. Москва, Радиотехника, 2016, 332 с.

Статья поступила в редакцию 05.03.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бетанов В.В., Корянов В.В. Обобщение структурных свойств наблюдаемости и идентификации в задачах навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1872>

Бетанов Владимир Вадимович — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, заместитель начальника центра АО «Российские космические системы». e-mail: vlavab@mail.ru

Корянов Всеволод Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: vkoryanov@mail.ru

Generalization of structural properties of observability and identification in problems of navigation and ballistic support of spacecraft control

© V.V. Betanov¹, V.V. Koryanov²

¹Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, 111250, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper focuses on the application of the introduced original properties of measuring tasks in the practice of navigation and ballistic support of spacecraft control. Based on the presentation of mathematical models of dynamic and measuring systems, as well as on the uncertainty of the considered quantities, a classification of measuring tasks is given. The methods of statistical and confluent analysis of parametric identification of complex dynamic objects, which are essentially special cases of the structural observability property, are investigated. The paper gives a classical mathematical formulation of the measuring task, and shows that the traditional study of the considered characteristic properties of such tasks for emergency situations is insufficient. At the same time, the task of the technological cycle of navigation-ballistic support for determining the parameters of spacecraft motion should be presented as an object-system task — a tool for solving. Such measuring tasks are proposed to be characterized by generalized structural properties. In this paper, we studied the application of generalized observability and generalized identification to the practical tasks of navigation and ballistic support of spacecraft control. As a result, we proposed an algorithm for checking generalized observability and identification in measuring tasks. Findings of research show that the machinery of the theory of ultra-operators and ultra-systems is effective for the study of such tasks when using the information derivative.

Keywords: measuring task, structural properties of measuring tasks, observability, identifiability, generalized properties of measuring tasks, navigation and ballistic support, spacecraft

REFERENCES

- [1] Betanov V.V., Koryanov V.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 7 (700), pp. 92–99.
- [2] Tyulin A.E., Betanov V.V., Kobzar A.A. *Navigatsionno-ballisticheskoe obespechenie poleta raketno-kosmicheskikh sredstv. Kniga 1. Metody, modeli i algoritmy otsenivaniya parametrov dvizheniya* [Navigation and ballistic support of the flight of rocket and space systems. Book 1. Methods, models and algorithms for estimating motion parameters]. Monograph. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018, 479 p.
- [3] Tyulin A.E., Betanov V.V., Yurasov V.S., Strelnikov S.V. *Navigatsionno-ballisticheskoe obespechenie poleta raketno-kosmicheskikh sredstv. Kniga 2. Sistemy analiz NBO* [Navigation and ballistic support of the flight of rocket and space systems. Book 2. System analysis of navigation and ballistic support]. Monograph. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018, 487 p.
- [4] Lysenko L.N., Betanov V.V., Zvyagin F.V. *Teoreticheskie osnovy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniya kosmicheskikh poletov* [Theoretical bases of

- ballistic-navigation support of space flights]. Monograph. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 518 p.
- [5] Krasovskiy A.A., ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook of automatic control theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 712 p.
- [6] Razorenov G.N. *Vvedenie v teoriyu otsenivaniya sostoyaniia dinamicheskikh sistem po rezul'tatam izmereniy* [Introduction to the theory of estimating the state of dynamic systems based on measurement results]. Moscow, USSR Ministry of Defence Publ., 1981, 272 p.
- [7] Chechkin A. V. *Matematicheskaya informatika* [Mathematical informatics]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 416 p.
- [8] Bayramov K.R., Betanov V.V., Stupak G.G., Urlichich Yu.M. *Upravlenie kosmicheskimi obektami. Metody, modeli i algoritmy resheniya nekorrektnykh zadach navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniya* [Space objects control. Methods, models and algorithms for solving ill-posed problems of navigation and ballistic support]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, 360 p.
- [9] Lysenko L.N., Betanov V.V. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Polet» — All-Russian Scientific-Technical Journal “Polyot”*, 2016, no. 8–9, pp. 3–20.
- [10] Stepanov O.A. *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoy informatsii. Ch. 1. Vvedenie v teoriyu otsenivaniya* [Fundamentals of the estimation theory with applications to the tasks of navigation information processing. Part 1. Introduction to the estimation theory]. St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor Publ., 2010, 509 p.
- [11] Tyulin A.E., Betanov V.V. K voprosu povysheniya ustoychivosti resheniya obobshchennykh nekorrektnykh zadach navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniya na razlichnykh etapakh poleta KA [On the issue of increasing the stability of the solution of generalized ill-posed tasks of navigation and ballistic support at various stages of a spacecraft flight]. *Fundamentalnoe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie (KVNO-2017). Tr. 7-y Vseros. konf., St. Petersburg, 17–21 aprelya 2017* [Fundamental and applied coordinate time and navigation support (CTNS-2017). Proc. 7th All-Russ. Conf., St. Petersburg, April 17–21, 2017]. St. Petersburg, IAA RAS Publ., pp. 196–198.
- [12] Vasilev D.G., Nedogorok A.A., Betanov V.V. Obobshchenie strukturnogo ponyatiya nablyudaemosti v zadachakh opredeleniya parametrov dvizheniya kosmicheskikh apparatov [Generalization of the structural concept of observability in the problems of determining the motion parameters of spacecraft]. *Aktualnye problemy Rossiyskoy kosmonavtiki RAN. Tr. XXXIX akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, Moskva, 27–30 yanvarya 2015* [Special topics in Russian cosmonautics of RAS. Proc. XXXIX Academic Readings on Cosmonautics, Moscow, January 27–30, 2015]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, pp. 31–33.
- [13] Betanov V.V., Larin V.K. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 3–10.
- [14] Betanov V.V., Larin V.K. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy — Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 64–72.
- [15] Tyulin A.E., Betanov V.V. *Letnye ispytaniya kosmicheskikh obektov. Opredelenie i analiz dvizheniya po eksperimentalnym dannym* [Flight tests of space objects. Movement detection and analysis according to experimental data]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016, 332 p.

Betanov V.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Deputy Head of the Center, Joint Stock Company “Russian Space Systems”. e-mail: vlavab@mail.ru

Koryanov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: vkoryanov@mail.ru