

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 004.9: 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.69.76

## Системный подход к решению измерительных задач баллистико-навигационного обеспечения полетов космических аппаратов

**В. К. Ларин**, *к. т. н., с. н. с., contact@spacecorp.ru*  
*АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация*

**Аннотация.** В статье рассмотрена методология решения измерительных задач баллистико-навигационного обеспечения полетов космических аппаратов с использованием системного подхода. Приводится определение системного подхода как последовательного выполнения этапов: классификации задач, определения степени структурированности измерительных задач, выбора метода решения и разработки технологии решения. Реализация проделанных исследований представлена на примере решения одной из центральных задач баллистико-навигационного обеспечения — предварительной обработки траекторных измерений космических аппаратов.

Разработанная методика определения степени структуризации измерительных задач позволяет уточнять их место в перечне формализованных задач.

Предлагаемая технология решения измерительных задач в рамках системного подхода позволяет путем последовательных действий найти метод решения, зависящий от степени структуризации задачи.

**Ключевые слова:** измерительная задача, предметная область, степень структуризации, информационный параметр

## System Approach to Solve Measurement Problems of Ballistic-Navigation Support for Spacecraft Flights

**V. K. Larin**, *Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, contact@spacecorp.ru*  
*Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers the methodology of solving measurement tasks of ballistic-navigation support of spacecraft flights using a system approach. The definition of a system approach as a sequential performance of the stages: classification of tasks, determining the degree of structuring of measurement tasks, selecting the method of solution, and development of solution technology is given. Implementation of the research is presented on the example of solving one of the central tasks of ballistic-navigation support: preliminary processing of trajectory measurements of spacecraft.

The developed methodology for determining the degree of structuring of measurement tasks allows specifying their place in the list of formalized tasks.

The proposed technique for solving measurement tasks within the framework of the system approach permits finding a solution method, which depends on the degree of task structuring, by means of sequential actions.

**Keywords:** measurement task, subject area, degree of structuring, information parameter

## Введение

Абстрактное рассмотрение измерительных задач (ИЗ) не позволяет найти универсальный способ решения. Предварительно необходимо привязать ИЗ к конкретной предметной области путем использования классификационной таблицы, что значительно сужает круг поиска метода решения.

В данной статье рассматривается область задач, относящихся к баллистико-навигационному обеспечению (БНО) космических аппаратов (КА).

Как правило, искомые характеристики в задачах БНО должны иметь числовые значения, следовательно, общей проблемой можно считать нахождение формального решения ИЗ, а в случаях сбоя — определение его причин.

Большинство авторов определяют понятие «задача» как некоторый неизвестный объект исходя из лингвистического значения слова «задача» — загадка, целью которой является нахождение характеристик объекта при известных исходных данных и условиях [1].

Для решения данной проблемы с использованием системного подхода в статье предлагается расширить понятие «задача» путем включения в него процедуры «решения».

Тогда под термином «задача» будем понимать систему, состоящую из трех составных частей: постановочной, методической и технологической.

В частности, постановочная часть состоит из подсистем цели, входных и выходных данных и условий достижения решения. Методическая часть — из методики, алгоритма и программы. Технологическая часть представлена информационно-вычислительной системой (ИВС), адаптированной к решению конкретной задачи.

Данное положение подтверждается практикой использования БНО, где вся работа строится и оценивается по полученным результатам решения задачи, процесс получения которой состоит из постановки, программно-методического решения и расчетов.

Системный подход основывается на реализации основных задач системного анализа:

– **задачи декомпозиции**, которая означает представление системы в виде подсистем, состоящих из более мелких элементов. Для реализации

данной задачи целесообразно использовать методы структурного анализа;

– **задачи анализа**, заключающейся в нахождении различного рода свойств системы, ее элементов и окружающей среды с целью определения закономерностей поведения системы. Основой решения данной задачи является определение информационных параметров в блоках структуры, а также анализ связей между функциональными элементами задачи;

– **задачи синтеза**, которая состоит в том, чтобы на основе знаний о системе, полученных при решении первых двух задач, создать модель системы, определить ее структуру, параметры, обеспечивающие эффективное функционирование системы, решение задачи и достижение поставленных целей [1].

Решение задачи может быть представлено в виде структурно-технологической модели с описанием условий перехода между блоками системы.

Таким образом, решение ИЗ с использованием системного подхода сводится к последовательному выполнению следующих этапов:

- классификация ИЗ,
- анализ частей структуры ИЗ БНО,
- определение степени структурированности измерительной задачи (ССЗ),
- выбор метода решения ИЗ,
- разработка технологии решения ИЗ БНО.

## Основные понятия

В рассматриваемой предметной области БНО КА целесообразно выделить основные понятия, относящиеся к вопросам системного подхода для решения технических задач.

Ниже приводится указанный перечень основных понятий.

**Системный подход** — иерархически упорядоченная совокупность вопросов, характеризующих определенные элементы исходя из общего предназначения объекта.

Задачу необходимо рассматривать как систему, в которой выделены элементы, внутренние и внешние связи, наиболее существенным образом влияющие на исследуемые результаты ее функционирования, а также цели каждого из элементов.

**Проблема** — разница между действительным и желаемым состоянием объекта.

**Измерительная задача** — задача обработки измерений с целью определения физических свойств (или характеристик) измеряемого объекта [2].

**Предметная область** — совокупность объектов, свойств и функциональных связей между ними, присущих области решений данной задачи.

**Информационный параметр (ИП)** — количественная или качественная характеристики «неисправности» различного вида, проявляющейся в элементах системы в процессе решения задачи.

**Структура** (от лат. structure — строение, расположение, порядок) — совокупность устойчивых связей объекта, обеспечивающих или целостность и тождественность самому себе, или сохранение основных свойств при различных внешних и внутренних изменениях.

**Баллистико-навигационное обеспечение (БНО)** — основной вид информационного обеспечения управления полетом КА.

**Системный анализ (СА)** — научный метод познания, представляющий собой последовательность действий по установлению структурных связей между элементами исследуемой системы.

**Формальные методы (ФМ)** — математические методы решения формализованных задач.

**Эвристические методы (ЭМ)** — качественные методы решения слабоструктурированных и неструктурированных задач.

**Информационно-вычислительная система (ИВС)** — совокупность данных (или баз данных (БД)), систем управления базами данных и прикладных программ, функционирующих на вычислительных средствах как единое целое для решения определенных задач.

**Система** — совокупность взаимосвязанных элементов.

## Классификация измерительных задач

Классификация ИЗ осуществляется по следующим признакам: степени структурированности, типу измерительной информации и методу решения ИЗ (обработки измерительной информации).

По степени структурированности выделяют ИЗ:

- структурированные,
- неструктурированные,
- слабоструктурированные,
- квазиструктурированные.

Согласно классификации, предложенной Г. Саймоном и А. Ньюэллом [3], все множество проблем (или задач), в зависимости от глубины их познания, подразделяется на три класса:

- хорошо структурированные или количественно выраженные проблемы, которые поддаются математической формализации и решаются с использованием формальных методов;

- неструктурированные или качественно выраженные проблемы, которые описываются лишь на содержательном уровне и решаются с использованием неформальных процедур;

- слабоструктурированные проблемы, содержащие количественные и качественные зависимости, причем качественные относятся к малоизвестным и неопределенным объектам и имеют тенденцию к доминированию.

Дополнительно введен еще один тип задач, располагающийся между структурированными и слабоструктурированными задачами — квазиструктурированные задачи; в большинстве случаев они имеют формализованное решение, но с отклонениями по точности решения.

ИЗ разделяются по типу измерительной информации:

- дальности,

- фазе,

- разности дальностей и разности фаз в случае использования измерений КА глобальной навигационной системы.

Различают следующие методы решения ИЗ (обработки измерительной информации):

- статистический — метод, используемый для обработки большинства видов измерительной информации;

- аналитический — метод получения точного числового решения, в частности рассматривается кинематический метод определения орбиты КА с использованием одномоментных навигационных определений;

- эвристический — метод получения неформального решения, в частности «дерево целей»,

«прогнозный граф», метод «Дельфи», метод экспертных оценок, метод «сценариев».

Поскольку предметная область ИЗ достаточно большая, используется понятие «степень структуризации задач», цель которого сводится к упорядочению распределения ИЗ в предметной области в зависимости от корректности решения.

Процедура классификации необходима для определения предметной области ИЗ.

## Анализ частей структуры ИЗ БНО

Анализ частей структуры ИЗ БНО заключается в выявлении информационных параметров в каждом структурном блоке [3].

Структурная схема ИЗ без привязки к какой-либо предметной области может быть представлена в следующем виде (см. рисунок).

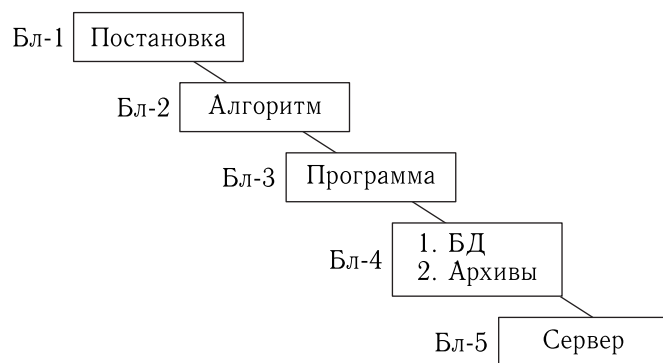


Рисунок. Структурная схема измерительной задачи

Анализ ИЗ БНО с учетом функционального наполнения блоков [4] позволяет сформировать следующий перечень ИП, привязанный к конкретной предметной области БНО (табл. 1).

## Определение степени структурированности задачи

Степень структурированности задачи (ССЗ) является ориентиром для выбора метода решения задачи.

Термин «слабоструктурированная проблема (задача)» говорит о слабых структурных связях частей системы или об их отсутствии. Аналитически связи между соседними блоками алгоритма

или программы можно описать с помощью математических выражений (условий перехода). По аналогии со структурными связями условия перехода могут отсутствовать либо быть неточно сформулированными. В таком случае происходит сбой решения или получается отличающийся по точности результат.

Введем понятие «вероятность получения количественного решения задачи —  $P(A)$ » (по аналогии с ССЗ).

Вероятность события  $A$  вычисляется как отношение числа благоприятных случаев  $m$  к общему числу случаев  $n$  [4]:

$$P(A) = m/n. \quad (1)$$

Рассмотрим два положения из теории вероятностей.

1. Вероятность появления какого-либо одного из нескольких несовместимых событий равна сумме вероятностей этих событий:

$$P_c = m_1/n_1 + m_2/n_2 + \dots + m_k/n_k. \quad (2)$$

2. Вероятность совместного появления нескольких событий равна **произведению вероятностей** этих событий:

$$P_c = m_1/n_1 \times m_2/n_2 \dots \times m_k/n_k. \quad (3)$$

По аналогии с формулой расчета вероятности благоприятных исходов события (1) формула для расчета степени СЗ будет иметь вид

$$N = (n - p)/n, \quad (4)$$

где  $n$  — общее число элементов в блоке,  $p$  — число ИП в блоке. Разность  $(n - p)$  представляет собой число «чистых» элементов в блоке.

Тогда с учетом выражений (2), (3) и (4) можно представить формулы для определения ССЗ для случая исключения влияния одного ИП в одном из блоков задачи:

$$N_1 = (n_1 - p_1)/n_1 + (n_2 - p_2)/n_2 + \dots + (n_k - p_k)/n_k, \quad (5)$$

где  $p_1, p_2, \dots$  — число ИП в блоке;

$n_1, n_2, \dots$  — количество всех элементов в соответствующем блоке задачи.

Таблица 1. Перечень информационных параметров ИЗ БНО

Функциональное содержание блока	Обозначение ИП	Характеристика ИП	Примечание
Бл-1 Постановка			
Описание задачи	ИПп-1	—	Не выявлено
Бл-2 Алгоритм			
ИД	ИПа-1	Недостаточное количество ИД (const, измерений)	—
Типы измерений	ИПа-2	Не рассмотрен один из типов измерений	Например, дальность
Условия решения	ИПа-3	Отдельные условия не соответствуют физическому смыслу входящих величин	—
Математико-статистические методы	ИПа-4	Ошибки в зависимостях используемых методов	МНК (метод наименьших квадратов), Монте-Карло
Бл-3 Программа			
Исходные данные	ИПпр-1	Недостаточное количество ИД (const, измерений)	—
Расчет параметров орбит навигационных КА	ИПпр-2	Ошибки в модели движения КА	—
Расчет базовых линий	ИПпр-3	Нарушения в условиях выбора базовых линий	—
Фильтрация и разрядка измерений	ИПпр-4	Неправильно заданы параметры фильтрации	—
Формирование разностей и сеансов измерений	ИПпр-5	Число измерений в сеансе ( $n$ ) не соответствует норме	$n < 10$
Бл-4-1 База данных			
Настройка доступа к БД	ИПб-1	Неправильная настройка параметров доступа к БД	См. программу «Формирование рабочих настроек»
Формирование и исполнение запросов к БД	ИПб-2	Откат отдельных транзакций при обращении к БД	—
Формирование таблиц БД	ИПб-3	Наличие одинаковых записей или полей в таблице	—
Функция объединения таблиц	ИПб-4	Выбор неправильного признака объединения таблиц	—

Таблица 1. Окончание

Функциональное содержание блока	Обозначение ИП	Характеристика ИП	Примечание
Бл-4-2 Архивы			
Настройка локальных путей хранения информации	ИПар-1	Неправильная настройка локальных путей	—
Списки измерительных станций	ИПар-2	Несоответствие списков станций	—
Списки базовых линий	ИПар-3	Несоответствие списков базовых линий	—
Настройка доступа к каталогам SP3	ИПар-4	Неправильная настройка доступа к каталогам SP3	—
Бл-5 Сервер			
Сервер ЦБД	ИПс-1	Сбой при промежуточном обращении к ЦБД	—
Сервер предварительной обработки измерений	ИПс-2	Неправильные настройки расчетных параметров	—
Сервер краевой задачи по «фазе»	ИПс-3	Некорректное определение скачков фазы	—
Сервер краевой задачи по «коду»	ИПс-4	Отсутствие данных ЭВИ	—

Для случая исключения влияния одновременно нескольких ИП в различных блоках задачи:

$$N_2 = (n_1 - p_1)/n_1 \times \dots \times (n_k - p_k)/n_k. \quad (6)$$

$N_1$  и  $N_2$  для единичных или нескольких ИП не могут рассматриваться как элементы алгоритма задачи, однако их использование целесообразно для определения направления поиска методов решения, что значительно ускоряет процедуру решения.

## Выбор метода решения измерительных задач

### Критерии выбора

Как указывалось выше, критериями выбора метода решения ИЗ могут быть значения степени структурированности задач  $N$ .

Ниже предлагается обобщенное числовое распределение типа ИЗ и величины структурированно-

сти  $N$  при условии, что  $N$  для структурированных задач = 1, для неструктурированных задач = 0 [5].

В этом случае

- для структурированных задач  $N_i = 1$ ;
- для квазиструктурированных задач  $1 > N_i \geq 0,5$ ;
- для слабоструктурированных задач  $0,5 < N_i > 0$ ;
- для неструктурированных задач  $N_i = 0$ .

Исходя из опыта работ по БНО КА можно принять, что для решения ИЗ используются следующие методы:

- аналитические (А),
- статистические (С),
- статистические со снижением точности (ССТ),
- эвристические (ЭМ).

Для удобства данные зависимости между степенью структуризации и методом решения приведены в табл. 2; А + С означает возможность

Таблица 2. Зависимость метода решения от степени структуризации ИЗ

Типы ИЗ	Методы решения ИЗ				
	$N$	$A + C$	ССТ	ССТ + ЭМ	ЭМ
Структурированные	1	+			
Квазиструктурированные	$1 > N \geq 0,5$		+		
Слабоструктурированные	$0,5 < N > 0$			+	
Неструктурированные	0				+

использования двух методов решения — аналитического и статистического.

Конкретные названия методов для решения ИЗ приведены в табл. 3 [6].

Таблица 3. Перечень основных методов, используемых для решения ИЗ

Типы методов	Наименования методов
Формальные методы	Аналитические Статистические Теоретико-множественные Лингвистические Семиотические Графические
Эвристические методы	Морфологический подход Методы «дерево целей» Методы «Дельфи» Методы экспертных оценок Методы «сценариев» Методы мозгового штурма (атаки)

В большинстве случаев формальные методы применяются для решения структурированных задач, эвристические методы — для слабоструктурированных и неструктурированных задач.

Из формальных методов наиболее часто используются аналитические и статистические методы, из эвристических методов — метод экспертных оценок, включая экспертные системы, морфологический подход и метод мозгового штурма [5].

## Способ выбора

Выбор метода решения сводится к следующим действиям.

1. Выбирается вариант расчета  $N$  в зависимости от случаев возникновения сбоев из-за воздействия ИП. Возможны варианты:

– блокирование реакции одного ИП в одном из блоков задачи (формула (5));

– блокирование влияния одновременно нескольких ИП в каждом блоке задачи (формула (6)).

2. В зависимости от варианта решения с использованием данных табл. 1 рассчитывается значение  $N_i$ .

3. По значению  $N_i$  по табл. 2 определяется тип ИЗ и выбирается метод решения.

## Технология решения ИЗ БНО

Технологию решения ИЗ рассмотрим на примере решения задачи БНО «предварительная обработка траекторных измерений (ПРО)», относящейся к типу измерительных задач.

Для простоты в качестве измерительной информации возьмем кодовую дальность  $d$ :

$$d = c \cdot t, \quad (7)$$

где  $c$  — скорость света;  $t$  — время прохождения сигнала от передающей антенны КА до приемной антенны измерительного пункта.

Цель задачи ПРО заключается в фильтрации «сырых» измерений (формат Ріпех-файлов) и формировании сеансов измерений в пределах заданного цикла радиоконтроля орбиты (РКО). Будем считать БНО предметной областью ИЗ, а ее контентом — задачу ПРО.

Согласно приведенным выше этапам системного подхода на первом этапе определяется место ИЗ в классификационном перечне.

Установлено, что задача ПРО относится к ИЗ предметной области БНО по критерию «тип измерительной информации» — дальность.

На втором этапе проводится анализ структурных частей задачи ПРО с целью определения наиболее уязвимых к сбою частей по значениям ИП.

Для расчета значения ССЗ примем вариант «блокирование влияния одного ИП в одном из блоков задачи». При этом необходимо учесть следующее замечание: ввиду того, что работа блоков задачи происходит последовательно во времени и блоки не могут работать одновременно, сумма (5) сокращается до одного слагаемого (любого из блоков задачи), как это следует из названия варианта.

Тогда

$$N_1 = (n_k - p_k)/n_k, \quad (8)$$

где  $n_k$  — общее число элементов в выбранном блоке  $k$ ;  $p_k$  — число ИП в блоке  $k$ .

Исходные данные для расчета  $N_1$  с учетом данных табл. 2 приведены в табл. 4.

Таблица 4. Исходные данные для расчета степени структуризации  $N_1$

№ п/п	Наименование блоков	Число ИП в блоке ( $p_k$ )	Число элементов в блоке ( $n_k$ )
1	Постановка задачи	—	> 10
2	Алгоритм	4	> 100
3	Программа	4	> 100
4	Блоки памяти (БД, архив)	5	> 100
5	Сервер	4	> 100

Подставляя данные из табл. 4 (для любого блока) в (8), получим значение  $0,5 < N_1 < 1$ .

Соответственно полученному значению  $N_1$  задача ПРО, согласно табл. 2, относится к квазиструктурированным задачам и решается статистическими методами (в частности, методом наименьших квадратов, со значением предельно допустимой ошибки результата, не превышающей  $3,5 \times \sigma$ , ( $\sigma$  — среднеквадратическая ошибка измерения)).

Таким образом, для задачи ПРО определены предметная область — БНО КА, степень структурированности задачи —  $N_1$ , метод решения — статистический с возможным понижением точности решения, что подтверждает практическую значимость проведенных исследований.

## Заключение

1. Разработана методология решения измерительных задач с использованием системного подхода, представляющая возможность определять методы решения ИЗ для конкретной предметной области.

2. Дано определение системного подхода как последовательного выполнения этапов классификации задачи, степени ее структуризации, выбора метода и технологии решения.

3. Разработана методика определения степени структуризации измерительных задач, позволяющая уточнять их место в общем перечне задач БНО.

4. Разработана технология решения измерительных задач в рамках системного подхода, позволяющая путем последовательных действий найти метод решения, зависящий от степени структуризации задачи.

## Список литературы

1. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ: учебник / Ф.П. Тарасенко. Томск: Издательство Томского университета, 2004. 185 с.
2. Бетанов В.В. Использование системного подхода к решению проблемных вопросов функционирования АКП БНО полетов КА ГНСС / В.В. Бетанов, В.К. Ларин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3, вып. 1. С. 3–10.
3. Бетанов В.В. К вопросу анализа причин возникновения сбоя в АКП / В.В. Бетанов, В.К. Ларин, З.А. Позяева // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 1, вып. 3. С. 55–60.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. 563 с.
5. Бетанов В.В. Концепция использования гибридной технологии в информационно-вычислительных системах / В.В. Бетанов, В.К. Ларин // Правовая информатика. 2018. №2. С. 39–46.
6. Ларин В.К. Построение прототипа экспертно-диагностической системы анализа траекторной измерительной информации / В.К. Ларин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4, вып. 1. С. 53-60.