

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева
Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени
А. Буркитбаева

УДК 608.2

На правах рукописи

Сулеев Тимур Адильжанулы

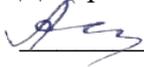
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации «Разработка методов полунатурной обработки телеметрической информации на основе алгоритмов Калмановской фильтрации»

Направление 6М074600 «Космическая техника и технологии»
подготовки

Научный руководитель
к.ф-м.н., зам.директора
Департамента АО «НЦКИТ»

 Р.Б. Акназарова
«__»июля 2020 г.

Рецензент

PhD, ассоц. профессор

 О.А. Баймуратов
«__»июля 2020 г.

Нормоконтроллер

м.т.н, ассистент

 А.М. Бапышев
«__»июля 2020 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ И. Сыргабаев

«__» _____ 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени
А. Буркитбаева

Кафедра Электроники, телекоммуникации и космических технологий
6M074600 – «Космическая техника и технологии»

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой ЭТиКТ

И.Сырगाбаев

« ____ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистрант Сулеев Тимур Адильжанулы

Тема диссертационной работы: «Разработка методов полунатурной обработки телеметрической информации на основе алгоритмов Калмановской фильтрации»

Объектом исследования являются методы полунатурной обработки телеметрической информации в процессе проведения стендовых испытаний.

Цель работы – разработка методов полунатурного моделирования обработки данных в информационной системе стендовых испытаний систем ориентации и стабилизации малых космических аппаратов на основе алгоритмов Калмановской фильтрации.

Метод или методология проведения работы. Методологической и теоретической основой исследования являются инструменты теории Калмановской фильтрации, полунатурного моделирования, проектирования и разработки информационно-управляющих систем, а также современные методы оценки экономико-математического моделирования сложных систем.

Результаты работы и их новизна. Результатом проделанной работы являются разработка и исследование информационной системы для полунатурной обработки телеметрической информации. Новизна проекта состоит в разработке структуры системы контроля и диагностирования ИНС в процессе стендовых испытаний, позволяющей оценивать техническое состояние на основе обработки наблюдений, как в реальном времени, так и после проведения испытаний.

Рекомендации по внедрению или итоги внедрения результатов НИР. Уникальность проекта заключается в обосновании и теоретическом исследовании новых структурных и алгоритмических методов полунатурного моделирования, а также программных средств, обеспечивающих повышение

эффективности оценки технического состояния систем на основе обработки наблюдений, как в реальном времени, так и после проведения испытаний. Рекомендуется использовать результаты диссертационной работы в целях оптимизации процесса проведения испытаний КА с использованием полунатурного моделирования.

Область применения. Полученные результаты найдут применение при проведении полунатурных испытаний на стендовой базе в процессе отработки новых изделий РКТ.

ГРАФИК подготовки магистерской диссертации

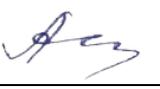
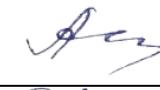
№ п/п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость в %
I.	Теоретическая часть Этап 1. <i>Знакомство с литературой по теме диссертации. Изучение существующих подходов к решению задачи. Выполнение литературного обзора.</i>	01.09.2018 - 11.03.2019	10
	Этап 2. <i>Разработка моделей движения макета системы ориентации. Математическое моделирование движения макета системы ориентации и алгоритма динамической аппроксимации.</i>	12.03.2019- 31.05.2019	20
	Этап 3. <i>Знакомство с опытом полунатурной обработки телеметрической информации на основе алгоритмов Калмановской фильтрации.</i>	31.05.2019- 15.09.2019	20
	Этап 4. <i>Создание комплексного расчётного модуля методов полунатурной обработки телеметрической информации на основе алгоритмов Калмановской фильтрации.</i>	16.09.2019- 15.11.2019	20
II.	Экспериментальная часть 1. <i>Организация численного эксперимента. Анализ результатов численного эксперимента.</i>	16.09.2019- 01.04.2020	20
III.	Публикации	-2019 год. 1 публикация в изданиях РК	
IV.	Оформление диссертации 1. <i>Оформление таблиц.</i> 2. <i>Построение графиков.</i> 3. <i>Подготовка текста диссертации.</i>	01.05.2019 – 30.06.2020	10

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

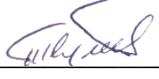
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Теоретическая часть	15 ноября 2019 г.	Выполнено
Экспериментальная часть	01 апреля 2020 г.	Выполнено
Результаты и их обсуждение	30 июня 2020 г.	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Теоретическая часть	к.ф-м.н. Р.Б.Акназарова	21 июля 2020 г.	
Экспериментальная часть	к.ф-м.н. Р.Б.Акназарова	21 июля 2020 г.	
Результаты и их обсуждение	к.ф-м.н. Р.Б.Акназарова	21 июля 2020 г.	
Нормоконтролер	м.т.н, А.М.Бапышев	24 июля 2020 г.	

Научный руководитель _____  Р.Б. Акназарова

Магистрант _____  Т.А. Сулеев

«24» июля 2020 г.

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрены вопросы разработки методов полунатурной обработки телеметрической информации, источниками которой могут выступать космические аппараты (КА), отдельные системы и их компоненты. В основе работы лежит процесс создания информационной системы, которая позволила бы обеспечить информационное сопровождение проводимых испытаний. Ключевой особенностью данной системы является возможность обработки поступающей информации как в потоковом режиме, близком к реальному масштабу времени, так и после проведения испытаний. В ходе работы были описаны требования, предъявляемые к системе и принципы ее разработки. Проведен краткий анализ требований к ее компонентам. Выбранные компоненты информационной системы были развернуты и интегрированы между собой. По итогам работы проведен эксперимент, подтвердивший работоспособность системы и потенциальную выгоду применения предложенного метода в процессе проведения полунатурного моделирования.

АҢДАТПА

Бұл жұмыста ғарыш аппараттарынан, немесе олардың жеке жүйелер мен компоненттерінен алынған телеметриялық ақпаратты жартылай құрылымдық өңдеу әдістерін әзірлеу мәселелері қарастырылды. Жұмыстың негізінде жүргізілетін сынақтарды ақпараттық сүйемелдеуді қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін ақпараттық жүйені құру процесі жатыр. Бұл жүйенің негізгі ерекшелігі келіп түсетін ақпаратты уақыттың нақты көлеміне жақын ағындық режимде, сондай-ақ сынақтар жүргізгеннен кейін де өңдеу мүмкіндігі болып табылады. Жұмыс барысында жүйеге қойылатын талаптар және оны әзірлеу принциптері сипатталды. Оның компоненттеріне қойылатын талаптарға қысқаша талдау жүргізілді. Ақпараттық жүйенің таңдалған компоненттері бір-бірімен біріктірілді. Жұмыс қорытындысы бойынша жүйенің жұмыс қабілеттілігін және ұсынылған әдісті жартылай құрылымдық үлгілеуді жүргізу процесінде қолданудың әлеуетті пайдасын растаған эксперимент өткізілді.

ANNOTATION

This dissertation deals with the development of methods for semi-natural processing of telemetric information, the sources of which can be spacecraft (SC), individual systems and their components. The work is based on the process of creating an information system that would provide information support for ongoing tests. A key feature of this system is the ability to process incoming information both in streaming mode, close to real time, and after testing. In the course of the work, the requirements for the system and the principles of its development were described. A brief analysis of the requirements for its components is carried out. The selected components of the information system were deployed and integrated with each other. Based on the results of the work, an experiment was carried out that confirmed the operability of the system and the potential benefit of using the proposed method in the process of semi-natural modeling.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
1. Роль полунатурной обработки телеметрической информации в системе испытаний малых космических аппаратов нано-класса на стендовой базе	12
1.1. Состав и функционал рассматриваемой стендовой базы	12
1.2. Информационная система стендовой базы	13
1.3. Элементы теории фильтра Калмана для задач обработки данных телеметрии	14
1.3.1 Линейная задача. Основные понятия	14
1.3.2 Матрица коэффициентов обратной связи	16
1.3.3 Коррекция значения ковариационной матрицы ошибки оценки вектора состояния	17
2. Разработка информационной системы стендовой базы для полунатурной обработки телеметрической информации	19
2.1. Назначение, задачи и принципы построения информационных систем для полунатурной обработки телеметрической информации	19
2.2. Разработка информационной системы стендовой базы для проведения полунатурного моделирования	20
2.3. Схема интеграции ИС в состав стендовой базы	27
2.4. Внедрение программных модулей на примере фильтра Калмана	27
3. Экспериментальные исследования алгоритмов обработки телеметрической информации на базе алгоритмов Калмановской фильтрации	31
3.1. Платформа для проведения эксперимента	31
3.2. Применение фильтра Калмана для математической модели одноосевого равноускоренного движения материальной точки	32
3.3. Анализ результатов эксперимента	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ	36
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Список публикаций	39

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых этапов разработки изделий ракетно-космической техники, важность которого сложно переоценить, является их опытная отработка. Данный этап характеризуется высокой степенью трудоемкости и может занимать до 80% времени выполнения проекта. Как правило, опытная отработка изделий выполняется путем проведения стендовых испытаний. В процессе проведения подобных испытаний собранные общие данные трансформируются в конкретные показатели и метрики, описывающие процесс или объект. Конечной целью проведения испытаний являются полноценные знания, полученные путем трансформации, анализа и сопоставления данных, полученных в ходе их проведения.

Применение методов математического моделирования в целях удешевления процесса разработки и отладки изделий РКТ можно часто встретить в деятельности специалистов национальных испытательных систем. Внедрение подобных методов позволяет добиться существенного сокращения затрат на процесс отработки РКТ и исследовать процессы, протекающие во время работы испытательных стендов и объектов испытаний. Применение подобных методов становится возможным благодаря использованию современного оборудования и высокопроизводительных программно-вычислительных средств. Все это в совокупности обеспечивает испытателям возможность проведения расчетов с высокой скоростью, построения графических зависимостей, моделирование исследуемых процессов и объектов. В современном мире подобный подход становится общепринятой практикой как в государственных учреждениях, так и в частных компаниях.

Математическое моделирование широко применяется и является наиболее эффективным на ранних этапах проектирования. Поздние же этапы характеризуются проведением испытаний с применением натурального моделирования. В свою очередь, методы полунатурного моделирования связаны с промежуточными этапами работы и занимают особенное место в процессе разработки сложных систем.

Под полунатурным моделированием подразумевается исследование управляемых систем на моделирующих комплексах с включением в состав модели реального изделия. Считается, что экспериментальный образец изделия уже готов, но не отлажены алгоритмы обработки сигналов, не исследованы особенности работы изделия аппаратуры во всем диапазоне изменения входного воздействия. В связи с этим полунатурные методы моделирования выходят на первый план, а разработка методов полунатурного моделирования является актуальной проблемой.

В качестве научной новизны работы выступает определение структуры и процесс разработки системы контроля и диагностирования ИНС в процессе проведения стендовых испытаний с применением полунатурного моделирования, предоставляющей возможность оценки технического состояния путем обработки наблюдений. При этом, система способна

выполнять обработку данных как в потоковом режиме, близком к реальному масштабу времени, так и с применением уже записанных результатов проведенных испытаний.

Научная новизна работы заключается в обосновании и теоретическом исследовании новых структурных и алгоритмических методов полунатурного моделирования, а также программных средств, обеспечивающих повышение эффективности оценки технического состояния систем на основе обработки наблюдений.

В ходе работы над данной диссертацией был проведен литературный обзор [1,2,3,4,5] научных публикаций, которые затрагивают вопросы работы с телеметрической информацией, поступающей как с борта космического аппарата в период его нахождения на орбите Земли, так и во время проведения наземных испытаний с применением стендовой базы. Помимо изучения работ, связанных непосредственно с телеметрией, были рассмотрены публикации, касающиеся роли информационной оболочки стендовой базы в процессе приема, обработки и хранения информации. Также был подробно рассмотрен принцип работы алгоритма Калмановской фильтрации, в частности в случае его применения для обработки телеметрической информации, поступающей с борта космического аппарата, а также пример его реализации в составе замкнутого контура автоматической системы управления космического аппарата, обеспечивающего возможность активного управления его ориентацией в процессе полета. Особенность последнего примера заключается во внимательном отношении к используемому ограниченному объему вычислительной мощности микропроцессора при разработке и внедрении программного обеспечения, ответственного за применение алгоритма Калмановской фильтрации в автономном режиме в ситуации построения системы управления на базе малоомощного бортового комплекса управления КА. Следует отметить, что не все приведенные выше материалы имеют непосредственное отношение к полунатурному моделированию, однако выполняют схожие задачи в области фильтрации значений, получаемых от различных единичных датчиков или сенсоров, либо их комплексных объединений.

1 Роль полунатурной обработки телеметрической информации в системе испытаний малых космических аппаратов nano-класса на стендовой базе

1.1 Состав и функционал рассматриваемой стендовой базы

В рамках данной работы используется гипотетическая стендовая база, предназначенная для испытаний малых космических аппаратов. На ее базе возможно проведение испытаний инерциальных навигационных систем (ИНС), бортовых комплексов управления и систем управления движением и навигацией (СУДН). Рассматриваемая стендовая база включает в себя автоматизированное рабочее место оператора и комплекс датчиков и имитаторов, применяемых в процессе проведения испытаний. Общая схема стендовой базы представлена на рисунке 1.1.1.

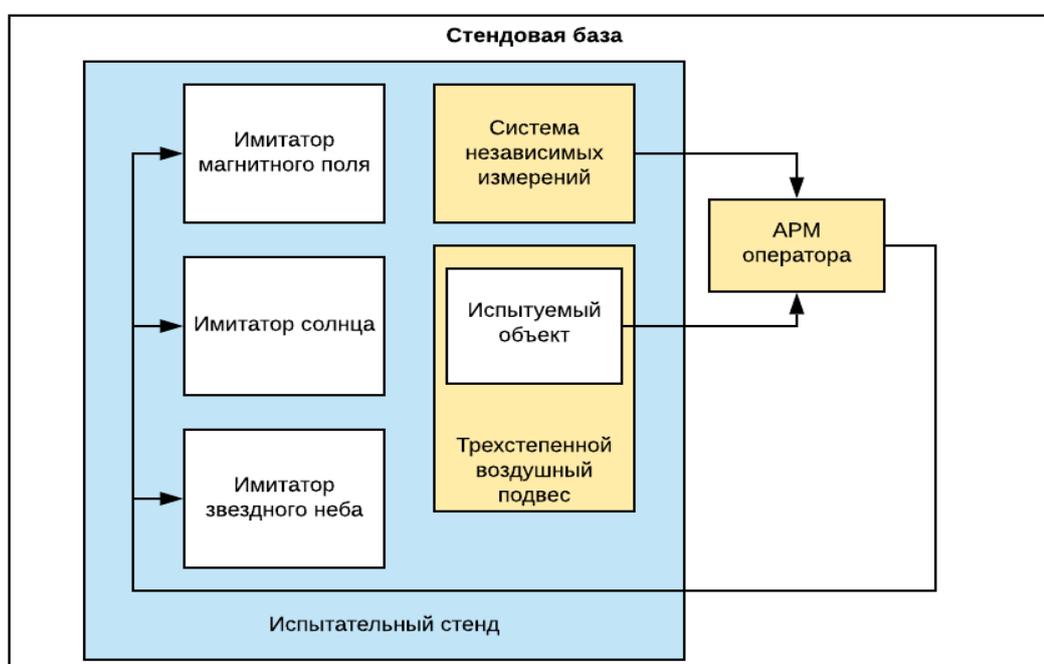


Рисунок 1.1.1 - Общая схема

Комплекс имитаторов предназначен для имитации условий космической среды и включает в себя:

– имитатор магнитного поля - путем взаимодействия с магнитным полем Земли изменяет вектор магнитного поля в области, в которой располагается объект испытаний, в соответствии с управляющими сигналами, полученными от АРМ оператора. Характеристики результирующего магнитного поля определяются путем математического моделирования на основе параметров предполагаемой орбиты;

– имитатор Солнца - позволяет имитировать солнечное излучение в виде направленного источника света;

– имитатор звездного неба - позволяет имитировать звездное небо в заданной точке орбиты с учетом ориентации платформы, на которой установлен объект испытаний;

– трехстепенной воздушный подвес - предназначен для обеспечения вращения испытуемого объекта с тремя степенями свободы. На подвес устанавливается платформа, на которой закреплено все необходимое для проведения испытаний - испытуемый объект, подсистема электропитания и связи объекта с АРМ оператора.

Комплекс датчиков, интегрированных в состав стендовой базы, позволяет получить эталонные показания ориентации испытуемого объекта. Для этого применяется система независимых измерений, которая способна с высокой точностью определить текущую ориентацию платформы, установленной на подвесе.

Автоматизированное рабочее место оператора представлено персональным компьютером с предустановленным специализированным программным обеспечением для управления работой стендовой базы, а также для сбора целевой и служебной информации в процессе проведения испытаний и ее дальнейшего хранения. Помимо ПО, АРМ оператора содержит в своем составе физические интерфейсы, обеспечивающие взаимодействие отдельных компонентов стендовой базы и испытуемых объектов с АРМ.

1.2 Информационная система стендовой базы

Информационная система стендовой базы является ее основным компонентом, обеспечивающим корректное взаимодействие отдельных ее компонентов. В общем случае информационная система стендовой базы решает следующие задачи:

– моделирование условий космического пространства посредством управления оборудованием имитаторов;

– получение данных с интегрированных датчиков, выступающих в качестве эталонных;

– получение данных от испытуемого объекта.

Моделирование условий космического пространства осуществляется путем отправки управляющих сигналов на оборудование имитаторов. Управляющие сигналы вырабатываются ИС на основе показаний комплекса эталонных датчиков и математического моделирования имитируемых процессов. Таким образом, для обеспечения достоверной имитации условий космического пространства ИС стендовой базы производит расчет орбиты по заданным характеристикам, после чего осуществляет моделирование процессов в каждой точке расчетной орбиты.

Наличие разнообразных интерфейсов позволяет реализовать взаимодействие ИС стендовой базы с объектом испытаний с целью получения телеметрической информации, генерируемой в процессе проведения

испытаний, а также передачи управляющих сигналов в случае реализации подобного функционала разработчиком испытуемого объекта. Полученная телеметрическая информация визуализируется, после чего сохраняется для проведения последующего анализа показаний систем испытуемого объекта и эталонной системы измерений.

1.3 Элементы теории фильтра Калмана для задач обработки данных телеметрии

Фильтр Калмана – это рекурсивный последовательный алгоритм оценки, применяющий принятую модель динамической системы с целью получения оценки, которая может подвергнуться существенной коррекции в результате проведения анализа каждой новой выборки измерений во временной последовательности.

Данный алгоритм находит широкое применение в процессах управления сложными динамическими системами, одним из примеров которых может выступать космический аппарат. Важнейшим условием, при котором управление динамической системой становится возможным, является знание всех ее состояний в каждый момент времени. Впрочем, получение необходимого количества измерений всех переменных, которыми возможно управлять, не всегда является возможным. Для решения этой проблемы используется фильтр Калмана, который позволяет восстановить недостающую информацию путем обработки неточных имеющихся данных измерений. В рамках данной работы будет рассмотрена реализация фильтра Калмана в рамках решения линейной задачи.

1.3.1. Линейная задача. Основные понятия

Предположим, что стохастическая система может быть описана моделями измерений и динамики (в случаях дискретного и непрерывного времени), которые представлены в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1 – Модели динамики и измерений

Модель	Непрерывное время	Дискретное время
Система	$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + \omega(t)$	$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + \omega_k$
Измерения	$z = H(t)x + v(t)$	$z_k = H_kx_k + v_k$
Шум системы	$E < \omega(t) \geq 0,$ $E < \omega(t)\omega^T(s) \geq \delta(t-s)Q(t)$	$E < \omega_k \geq 0,$ $E < \omega_k\omega_i^T \geq \Delta(k-i)Q_k$
Шум измерений	$E < v(t) \geq 0,$ $E < v(t)v^T(s) \geq \delta(t-s)R(t)$	$E < v_k \geq 0,$ $E < v_kv_i^T \geq \Delta(k-i)R_k$

Приведенный в таблице 1.3.1 $x(t)$ - вектор состояния динамической системы, являющийся случайным Гауссовским процессом, измерения, полученные в момент времени t_k - z_k . Шум измерений v_k и шум системы ω_k также выступают в качестве Гауссовских случайных процессов с нулевым математическим ожиданием. Иначе говоря, в рассматриваемой системе и измерениях предполагается наличие белого шума.

Задача фильтрации заключается в процессе поиска оценку вектора состояния системы x_k , которую мы будем обозначать \hat{x}_k , представляющую из себя функцию измерений $z_i \dots z_k$, которая минимизирует среднеквадратичную ошибку

$$E\langle [x_k - \hat{x}_k]^T M [x_k - \hat{x}_k]^T \rangle, \quad (1)$$

где M - симметричная положительно-определенная матрица.

Процесс фильтрации по Калману включает в себя два этапа: прогноз и дальнейшая коррекция. Предположим, что в момент времени t_{k-1} получена оценка вектора состояния системы $\hat{x}_{k-1}(-)$, после чего необходимо получить оценку в момент t_k . Для этого необходимо построить прогноз оценки $\hat{x}_k(-)$, используя в качестве основы \hat{x}_{k-1} , после чего происходит получение измерения z_k , далее происходит корректировка оценки в момент t_k , основанная на прогнозе и измерениях. В качестве результата выводится окончательная оценка вектора состояния $\hat{x}_k(+)$ (рисунок 1.3.1.1). $\hat{x}_k(+)$ называется апостериори оценка, $\hat{x}_k(-)$ называется априори оценка.

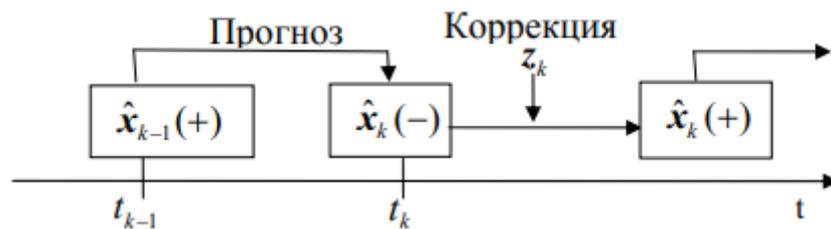


Рисунок 1.3.1.1 - Принцип работы Калмановской фильтрации

Второй момент рассматриваемого случайного процесса может быть описан в терминах ковариационной матрицы

$$P(t) = E\langle [x(t) - \hat{x}(t)][x(t) - \hat{x}(t)]^T \rangle \quad (2)$$

$P(t)$ является ковариационной матрицей ошибки оценки вектора состояния, или ковариационной матрицей ошибки.

Совершенно ясно, что для получения прогнозируемой оценки $\hat{x}_k(-)$ необходимо произвести интегрирование модельного динамического уравнения $\dot{x}(t) = F(t)x(t)$ с начальным условием $x(0) = \hat{x}_k(+)$. С целью описания процесса получения прогнозируемой оценки ковариационной

матрицы ошибки необходимо рассмотреть непрерывную модель системы уравнения (3), приведенную в Таблице 1.3.1.

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + \omega(t) \quad (3)$$

Решение данного уравнения с начальным условием $x(t_0)$ и переходной матрицей состояния $\Phi(t, t_0)$ может быть представлено в виде:

$$x(t) = \Phi(t, t_0)x(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)\langle\omega(\tau)\rangle d\tau \quad (4)$$

В то время как математическое ожидание данной величины:

$$E\langle x(t) \rangle = \Phi(t, t_0)E\langle x(t_0) \rangle + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)\langle\omega(\tau)\rangle d\tau \quad (5)$$

В таком случае:

$$[x(t) - E\langle x(t) \rangle] = \Phi(t, t_0)[x(t_0) - E\langle x(t_0) \rangle] + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau)\langle\omega(\tau)\rangle d\tau \quad (6)$$

После подстановки (6) в (2) и выполнения некоторых преобразований, становится возможным вычисление первой производной функции $P(t)$, в качестве результата описанных действий получаем:

$$\dot{P}(t) = F(t)P(t) + P(t)F^T(t) + Q \quad (7)$$

Полученный результат является матричным дифференциальным уравнением Риккати. Таким образом, получено уравнение продолжения ковариационной матрицы ошибки. Выполняя процесс интегрирования уравнения (7) при начальном условии $P(0) = P_{k-1}(+)$, получаем прогнозируемую оценку ковариационной матрицы ошибки $P_k(-)$

1.3.2 Матрица коэффициентов обратной связи

Допустим, что измерения были произведены в момент времени t_k , после чего эта информация применяется для оценки вектора состояния стохастической системы x в момент времени t_k . Допустим также, что существует линейная зависимость измерений от вектора состояния которая может быть описана уравнением:

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (8)$$

В случае если оценка $\hat{x}_k(+)$ базируется на наблюдениях (или измерениях) z_k то, она является $\hat{x}_k(-)$ функцией априори оценки и измерении z_k и описывается в следующем виде:

$$\hat{x}_k(+) = K_k^1 \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k z_k \quad (9)$$

В свою очередь матрицы K_k^1 и \bar{K}_k на текущем моменте неизвестны, а их значения могут быть определены таким образом, чтобы вновь полученная оценка $\hat{x}_k(+)$ удовлетворяла принципу ортогональности, условия которого описаны в следующем виде:

$$E\langle [x_k - \hat{x}_k(+)] z_i^T \rangle = 0, i = 1, 2, \dots, k - 1, \quad (10)$$

$$E\langle [x_k - \hat{x}_k(+)] z_k^T \rangle = 0 \quad (11)$$

Путем подставки в уравнение (10) значений x_k и $\hat{x}_k(+)$ из уравнений (1) и (9), с учетом того факта, что случайные последовательности ω_k и v_k некоррелированные, выполнив некоторые преобразования [5], получаем матрицы коэффициентов обратной связи:

$$K_k^1 = I - K_k H_k, \quad (12)$$

$$\bar{K}_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (13)$$

Полученная матрица коэффициентов представляет собой функцию от априори значения ковариационной матрицы ошибки.

1.3.3 Коррекция значения ковариационной матрицы ошибки оценки вектора состояния

Следующим этапом является выведение формулы апостериори значения ковариационной матрицы ошибки, которая используется для корректировки ковариационной матрицы ошибки. Согласно определению формула может быть записана в виде:

$$P_k(+) = E\langle \tilde{x}_k(+) \tilde{x}_k^T(+) \rangle, \quad (14)$$

$$\tilde{x}_k(+) = \tilde{x}_k(+)-x_k, \tilde{x}_k(-) = \tilde{x}_k(-)-x_k \quad (15)$$

Результатом подстановки (12) в (9) является:

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) \bar{K}_k [z_k - H_k \hat{x}_k(-)] \quad (16)$$

После вычитания x_k из обеих частей выражения (16) и подстановки в него значения z_k в соответствии с выражением (8), в качестве результата получим:

$$\hat{x}_k(+) - x_k = \hat{x}_k(-)\bar{K}_k H_k x_k + \bar{K}_k v_k - \bar{K}_k H_k \hat{x}_k(-) - x_k \quad (17)$$

При этом, если учесть выражение (15) получим:

$$\tilde{x}_k(+) = (I - \bar{K}_k H_k)\tilde{x}_k(-) + \bar{K}_k v_k \quad (18)$$

После выполнения подстановки (18) в (14), а также учета того, что $E\langle \tilde{x}_k(-) v_k^T \rangle = 0$, получим:

$$P_k(+) = (I - K_k H_k)P_k(-) \quad (19)$$

2 Разработка информационной системы стендовой базы для полунатурной обработки телеметрической информации

2.1 Назначение, задачи и принципы построения информационных систем для полунатурной обработки телеметрической информации

Полунатурное моделирование подразумевает использование комбинации натуральных компонентов разрабатываемой системы с математическими моделями еще не разработанных систем или систем, разработка которых в рамках проведения испытаний нецелесообразна. Интеграция натуральных компонентов с математическими моделями становится возможной благодаря внедрению специализированной информационной системы. Основным предназначением подобной информационной системы становится согласование работы физических компонентов системы с математическими моделями, создание среды для запуска математических моделей, организация информационного взаимодействия всех компонентов испытываемой системы, а также обработки и хранения всей поступающей и генерируемой информации в процессе проведения испытаний.

Информационная система, предназначенная для полунатурной обработки телеметрической информации, решает следующие задачи:

- обеспечение корректного взаимодействия физических компонентов с математическими моделями - обмен информацией и согласование работы;
- обеспечение корректного исполнения программ, содержащих в себе математические модели;
- запуск и исполнение прочих программ, предназначенных для обработки информации;
- сбор и обработка информации, поступающей как с физических компонентов, так и генерируемой математическими моделями;
- обеспечение целостности и сохранности данных в течение длительного периода времени;
- выгрузка данных испытаний для последующего анализа.

Исходя из описанных задач, разрабатываемая ИС для полунатурной обработки телеметрической информации должна включать в себя следующие компоненты:

- универсальный программный интерфейс или механизм интеграции специфичных программных интерфейсов до начала проведения испытаний;
- среду для запуска программного кода, реализующего математические модели, которые предоставлены заказчиком испытаний для использования в ходе выполнения работ по отработке исследуемой системы;
- механизм интеграции дополнительного ПО в структуру испытываемой системы;
- инструменты для сбора и обработки генерируемых в ходе испытаний данных;

– место хранения собранных данных.

Общая структура ИС, предназначенной для полунатурной обработки телеметрической информации, которая составлена с учетом описанных выше требований, представлена на рисунке 2.1.1.

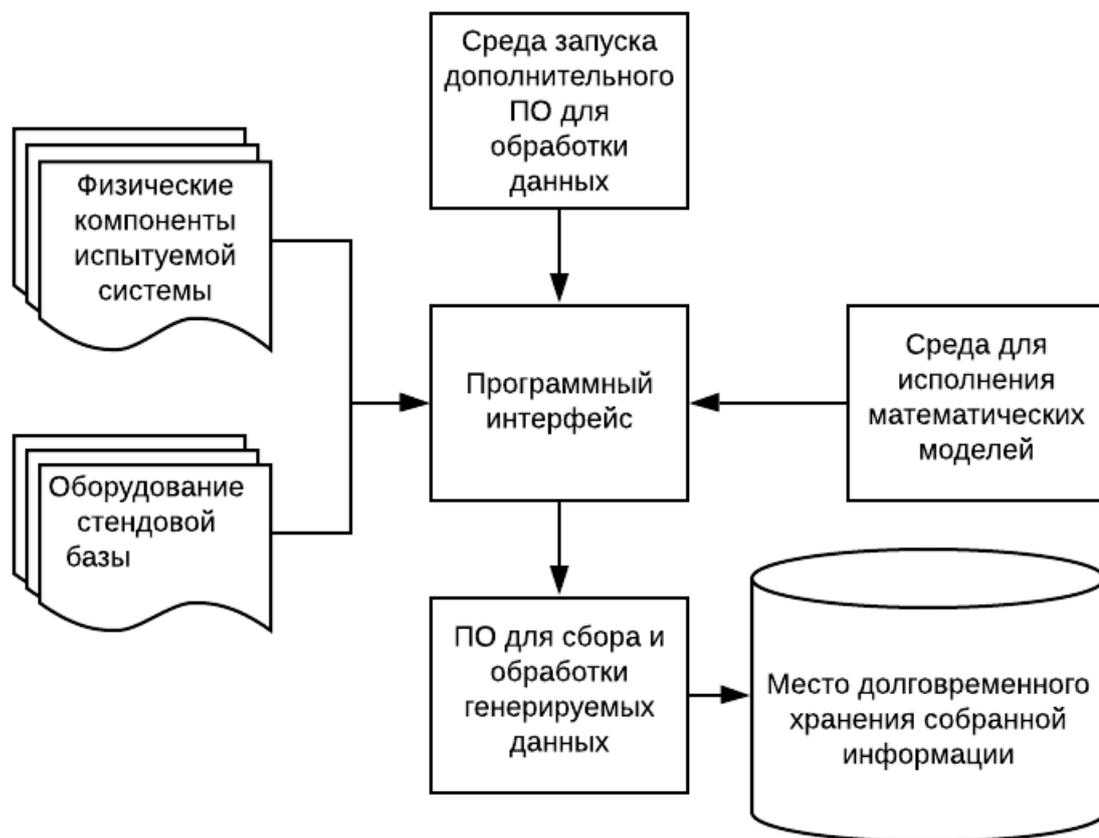


Рисунок 2.1.1 - Общая структура ИС, предназначенной для полунатурной обработки телеметрической информации

2.2 Разработка информационной системы стендовой базы для проведения полунатурного моделирования

Разработку ИС следует начинать с определения ключевых элементов на схеме, представленной на рисунке 2.1.1. Из приведенной схемы становится понятно, что одним из наиболее критичных является компонент под названием «программный интерфейс». Данный компонент является связующим и имеет связи практически со всеми прочими компонентами. Таким образом, данный элемент должен быть способен выполнять перенос информации между несколькими компонентами параллельно, а также доставлять информацию, полученную от одного источника нескольким адресатам сразу, либо предоставлять возможность интеграции многочисленных односторонних интерфейсов между компонентами. Кроме того, данный интерфейс не должен

ставить жесткие ограничения на формат передаваемой информации, а также на способ реализации интерфейса со стороны физических компонентов или математических моделей, предоставляемых заказчиком испытаний и разработчиком объекта испытаний.

Следующим по значимости компонентом можно назвать среду для запуска различного ПО (математических моделей, ПО для сбора и обработки получаемой информации). В качестве среды для запуска ПО может выступать единый компонент, который позволит запускать программный код по требованию. Данная среда также не должна накладывать значительные ограничения на процесс разработки ПО внешними разработчиками. Помимо этого, среда для запуска ПО должна обладать удобным интерфейсом для добавления новых модулей до начала проведения испытаний и обеспечивать возможность мониторинга процесса их исполнения.

Заключительным компонентом выступает место хранения собранных в процессе проведения испытаний данных. Собранные информация может быть сохранена в виде просто текстового файла, данные в котором будут записаны в строгом соответствии с определенным заранее форматом. Однако данный вариант делает информацию относительно сложной для анализа и накладывает значительные ограничения на поиск и выборку данных, содержащихся в подобных файлах. Более удобным и функциональным вариантом хранения информации является база данных (БД). База данных позволит осуществлять поиск и фильтрацию определенных данных во всем массиве записанной ранее информации, а также предоставляет механизмы обеспечения сохранения целостности данных в процессе их долговременного хранения.

Таким образом, архитектура ИС может быть сведена к трем основным компонентам, которые смогут решить все поставленные задачи за счет своей универсальности. Универсальность может быть достигнута в результате применения компонентов, не предъявляющих жестких требований к реализации взаимодействующего с ними ПО.

В ходе разработки ИС предлагается активное использование программных продуктов и инструментов с открытым исходным кодом. Данный подход позволит значительно сократить объемы времени и ресурсов, необходимых для разработки, благодаря тому, что основная часть работы будет сведена к двум этапам:

- поиск и сравнения существующего ПО с открытым исходным кодом пригодного для использования в составе ИС;
- интеграция отдельных выбранных программ в составе разрабатываемой ИС.

Побочным эффектом подобного подхода к разработке станет наличие технической поддержки, подробной технической документации с полным описанием всех возможностей инструмента, регулярных обновлений с целью повышения надежности и расширения функционала выбранных инструментов в течение длительного периода времени со стороны сообщества разработчиков

данных инструментов. Кроме того, применение инструментов с открытым исходным кодом значительно снижает сложность разработки стороннего ПО, взаимодействующего с ними благодаря наличию постоянно растущего количества готовых примеров решения различных задач, источником которых также становится сообщество разработчиков, заинтересованных в использовании данных инструментов.

Учитывая специфику испытаний КА, необходимо предусмотреть возможность адекватной работы, разрабатываемой ИС в условиях наличия большого количества источников информации, а также модулей, занимающихся ее обработкой. Так как нагрузка на систему и объем требуемых для поддержания ее работоспособности вычислительных ресурсов растут прямо пропорционально увеличению количества источников информации и запущенных математических моделей, возникает необходимость реализации возможности динамического увеличения вычислительной мощности и ресурсов доступных ИС. Для обеспечения высокой пропускной способности предлагается применение ПО и инструментов, предназначенных для использования в сфере обработки больших данных. Это предложение обусловлено изначальной оптимизацией подобных инструментов под задачи переноса и обработки больших объемов данных, значительными возможностями параллельного выполнения процессов обработки данных, а также возможностью практически линейного роста пропускной способности каждого компонента путем увеличения количества действующих экземпляров данного инструмента. Таким образом, применение инструментов из сферы обработки больших данных позволит выполнять, в случае необходимости, распределенные вычисления на нескольких компьютерах.

Для обеспечения возможности запуска компонентов на отдельных компьютерах с целью повышения пропускной способности ИС уже на этапе проектирования предлагается использование технологии контейнеризации приложений. Данный подход подразумевает изоляцию ПО и всех его зависимостей в отдельном «контейнере», который не зависит от операционной системы компьютера, на котором он запущен, а также позволяет работать с ПО словно оно установлено на отдельном компьютере. В качестве инструмента создания и запуска контейнеров выступит свободно распространяемое ПО с открытым исходным кодом «Docker», являющееся наиболее распространенным в области разработки распределенных ИС. Для согласованного запуска нескольких контейнеров предлагается использование инструмента `docker compose`. Данный инструмент не только обеспечивает согласованный запуск контейнеров, но и облегчает процесс обмена информацией между ними, а также позволяет автоматически перезапускать контейнеры в случае возникновения ошибок, ведущих к их отказам [14].

Общая схема архитектуры ИС, составленная на основе перечисленных выше ключевых компонентов, представлена на рисунке 2.2.1.

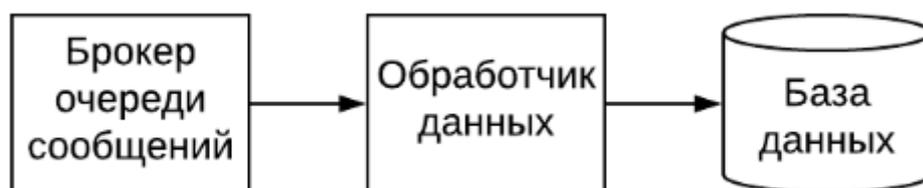


Рисунок 2.2.1 - Общая схема архитектуры ИС

В качестве универсального программного интерфейса предлагается использование одного из инструментов, относящихся к семейству брокеров очередей сообщений. Данный вид ПО предназначен для сбора данных из различных источников, перенаправления собранных данных и их хранения до момента достижения сообщением, содержащим в себе некоторую порцию данных места назначения. Способность передавать данные абсолютно любого формата даст разрабатываемой ИС желаемую универсальность и облегчит процесс реализации программных компонентов испытываемых систем сторонними разработчиками. Наиболее популярным инструментом в сфере Big Data является Apache Kafka.

Apache Kafka - это распределенный журнал сообщений, позволяющий реализовать эффективную маршрутизацию данных между различными системами. Одной из ключевых особенностей инструмента является обеспечение сохранности всех собранных данных в течение заданного периода времени даже в случае возникновения критического сбоя в работе, что позволит повысить надежность разрабатываемой ИС. Apache Kafka допускает маршрутизацию сообщений, полученных от единственного источника сразу нескольким потребителям, а значит позволит эффективно связать отдельные компоненты разрабатываемой ИС воедино. Кроме того, благодаря высокой популярности инструмента, для него разработаны интерфейсы под большинство популярных языков программирования (C++, Java, Python и т.д.), что также способствует упрощению процесса разработки и интеграции стороннего ПО [15].

Учитывая специфику процесса обработки телеметрической информации - необходимость обработки информации в виде непрерывного потока телеметрических кадров, в качестве среды для запуска различных программных модулей, предназначенных для генерирования и обработки данных, предлагается использование специализированного инструмента Apache Spark. Данный инструмент содержит в своем составе специализированный модуль, способный обрабатывать данные в потоковом режиме Spark Streaming, который имеет встроенный оптимизированный интерфейс для интеграции с Apache Kafka, что значительно упрощает процесс разработки ИС. Помимо этого, инструмент предоставляет возможность мониторинга и управления запущенными модулями. Apache Spark включает в себя интерфейсы, позволяющие запуск модулей, разработанных с использованием нескольких языков программирования (Java, Python и т.д.).

Apache Spark также реализует высокую степень устойчивости к возможной потере данных в процессе своей работы [16].

База данных, в свою очередь, также должна обладать возможностями динамического увеличения доступного для хранения данных, а также обеспечивать возможность повышения отказоустойчивости системы управления базой данных (СУБД) и сохранения целостности данных. Дополнительным требованием к БД можно назвать возможность повышения эффективности хранения данных благодаря сжатию данных на диске, а также оптимизации процесса считывания данных в случае выборки ограниченного количества данных (например, показаний определенного датчика).

При выборе базы данных для использования в составе разрабатываемой информационной системы необходимо учитывать специфику устройства телеметрического кадра. Так как показания датчиков, записанные в телеметрическом кадре, идут в строго заданной последовательности, а структура кадра и количество регистрируемых параметров, как правило, не меняется, можно сделать вывод, что мы имеем дело с повторяющимся набором данных с одним и тем же типом данных. В таком случае, целесообразным является применение так называемых колоночных БД. В подобных БД данные хранятся в таблицах, столбцы которых являются отдельными файлами. Подобная реализация позволяет реализовать эффективное сжатие файлов, содержащих данные одного и того же типа, а также оптимизировать процесс частичного чтения данных.

Исходя из описанных критериев, предлагается использование СУБД с открытым исходным кодом Clickhouse. Данная СУБД является колоночной БД, предназначенной для надежного хранения огромных объемов данных (допустимы объемы в несколько петабайт данных), специализированной под задачи анализа хранящихся данных. Среди особенностей СУБД можно выделить отсутствие возможности легкого изменения записанных данных, а также наличие встроенного интерфейса для интеграции с Apache Kafka [17].

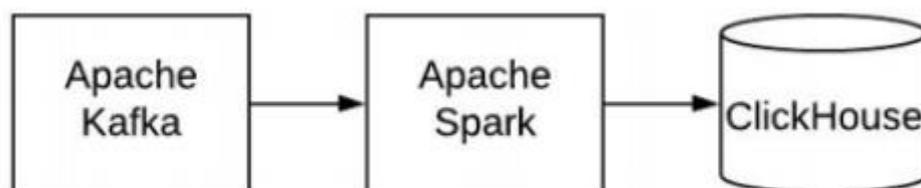


Рисунок 2.2.2 - Основные компоненты ИС

Итоговая архитектура ИС, включающая в себя перечисленные выше инструменты, предоставляет возможность легкой интеграции модулей между собой, обеспечивает широкие возможности в вопросах увеличения пропускной способности ИС и повышения ее отказоустойчивости путем увеличения количества контейнеров с инструментами как в пределах одного

компьютера, так и при использовании вычислительного кластера. Схема ИС представлена на рисунке 2.2.2.

Для улучшения функциональности, разрабатываемой ИС предлагается внедрить в ее состав хранилище метаданных. Основной его задачей будет передача метаданных и состояний объектов между различными модулями и итерациями обработки телеметрии. В качестве подобного хранилища предлагается использование СУБД Redis. Redis - это специализированная БД, хранящая данные в виде пар ключ-значение, и применяется для хранения временной информации, необходимой в ходе работы распределенного ПО. Высокая скорость работы и малое время отклика достигается за счет хранения всех данных в оперативной памяти без обращения к жестким дискам, что повышает угрозу потери данных. Впрочем, эта проблема частично компенсируется благодаря отсутствию жестких требований к сохранности временной информации.

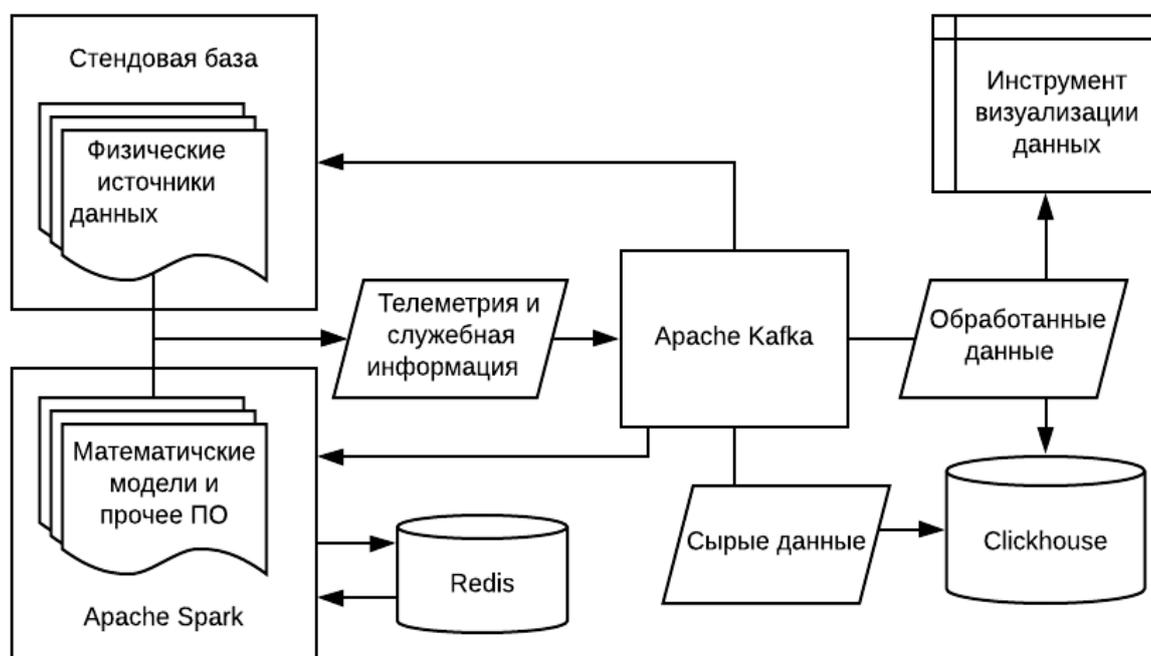


Рисунок 2.2.3 - Схема информационных потоков в разрабатываемой ИС

Приведенная на рисунке 2.2.3 схема демонстрирует основные потоки информации, существующие в ИС. В качестве первоначальных источников информации выступают физические источники данных (датчики стендовой базы, датчики в составе испытуемого объекта и т.д.) и математические модели, являющиеся частью процесса проведения полунатурного моделирования. Данные, генерируемые ими, поступают в программный интерфейс. Далее эти данные записываются в БД Clickhouse для долгосрочного хранения, а также могут быть получены модулями, предназначенными для обработки данных

запущенным в рамках Apache Spark. Примером подобных модулей могут стать различные варианты фильтрации полученных данных, основанных на применении фильтра Калмана. После обработки данных специализированными модулями они вновь отправляются в программный интерфейс Apache Kafka, откуда также сохраняются в БД.

Более подробное описание процесса обмена данными модулей на примере показаний гипотетического датчика GPS приведено на рисунке 2.2.4.

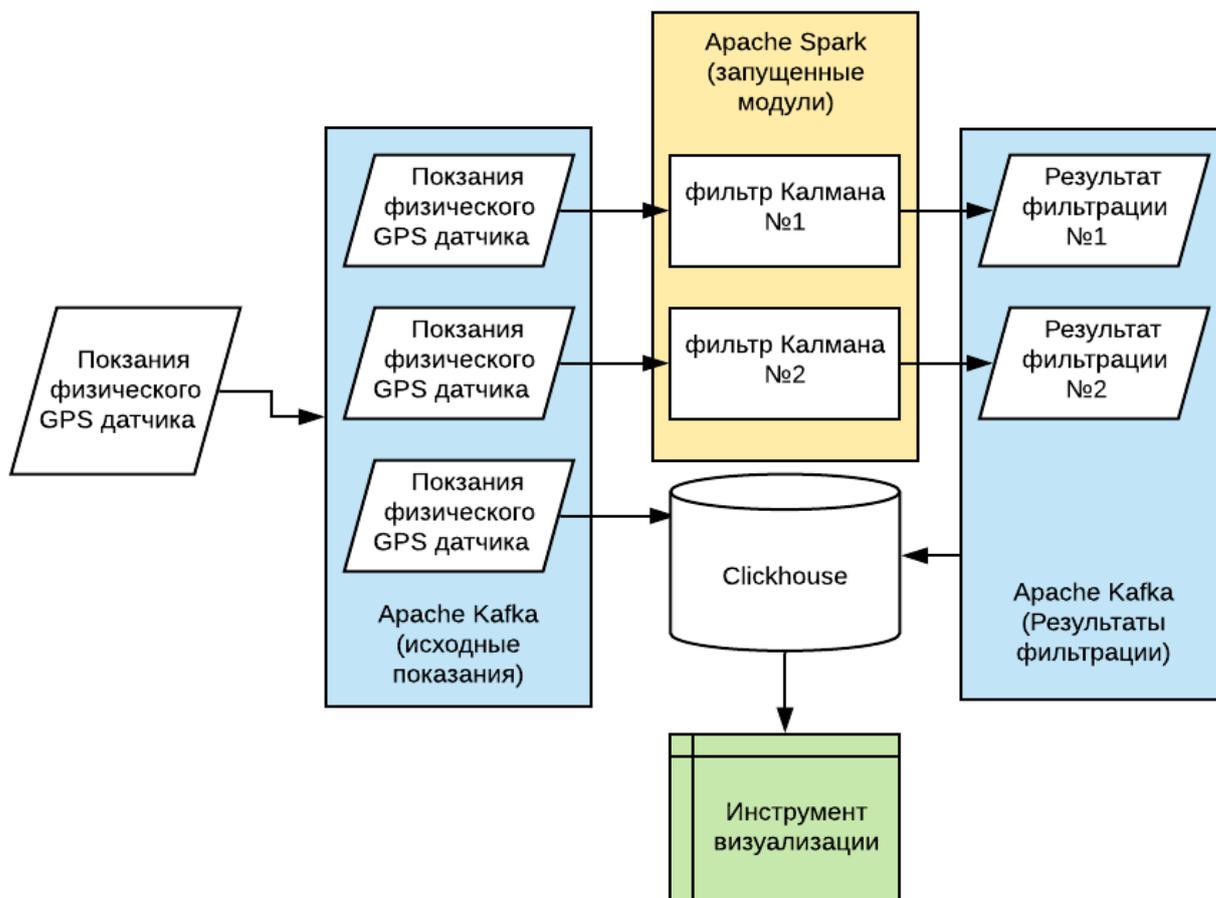


Рисунок 2.2.4 - Пример обработки показаний датчика GPS в разрабатываемой ИС

Данные о местоположении, источником которых стал физический датчик GPS, входящий в состав объекта испытаний, отправляются в программный интерфейс. Далее происходит маршрутизация полученного сообщения с показаниями датчика, данные доставляются двум потребителям в виде двух, отличных друг от друга реализаций фильтра Калмана, с целью сравнения их эффективности и точности. После обработки отфильтрованные показания местоположения передаются в программный интерфейс, откуда также сохраняются в БД. После этого появляется возможность построения

графиков для визуального сравнения результатов работы двух вариаций фильтров.

2.3 Схема интеграции ИС в состав стендовой базы

Применение универсального программного интерфейса упрощает не только процесс разработки стороннего ПО, но и процесс интеграции, разрабатываемой ИС в состав рассматриваемой стендовой базы. Для интеграции ИС для полунатурной обработки телеметрической информации с ИС стендовой базы достаточно реализовать дублирование данных, поступающих на АРМ оператора в программный интерфейс, после чего они станут доступны в разрабатываемой ИС. Схема интеграции систем представлена на рисунке 2.3.1.

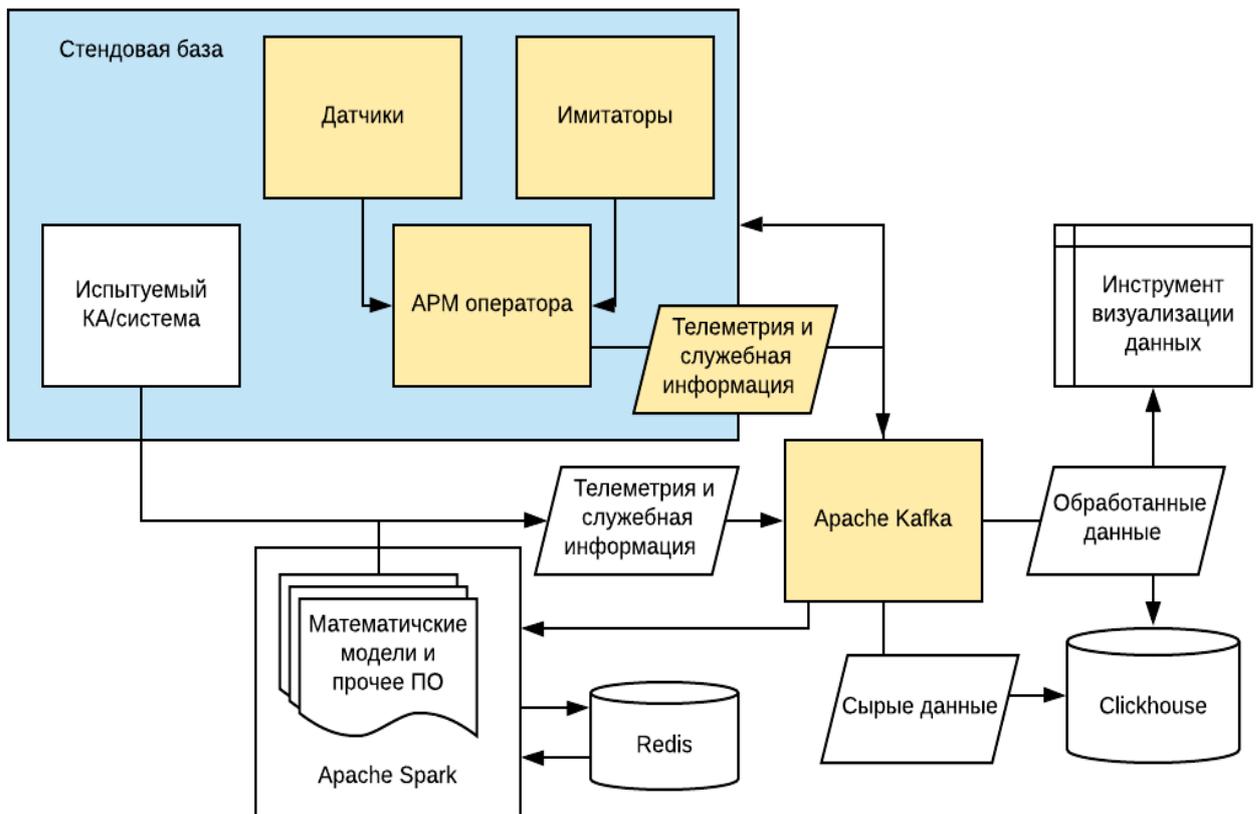


Рисунок 2.3.1 - Принципиальная схема предлагаемой системы

2.4 Внедрение программных модулей на примере фильтра Калмана

Разработка программных модулей на примере фильтра Калмана для предлагаемой информационной системы проведена с использованием языка программирования Python версии 3.7. Написание кода, его отладка и запуск

программного модуля выполнены с применением Jupyter Notebook - интерактивной среды разработки, специализированной для задач анализа данных.

Первым шагом разработки программного модуля стала реализация фильтра Калмана для группы показаний заданного размера с использованием стандартных средств языка Python. Графики построены с применением библиотеки Matplotlib.

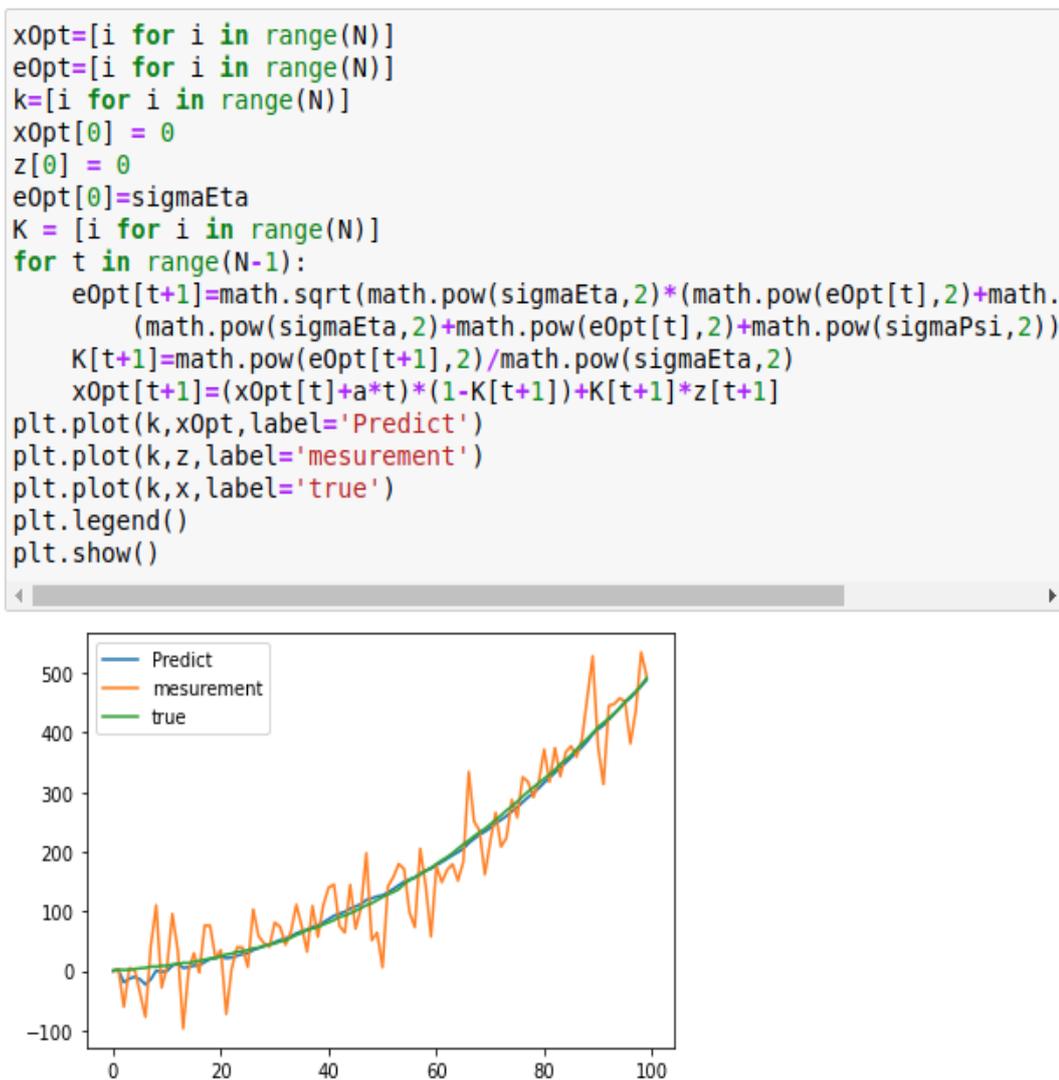


Рисунок 2.4.1 - Реализация фильтра Калмана для массива данных заданного размера

Для реализации версии модуля, пригодной для выполнения потоковой обработки данных, использован интерфейс PySpark для интеграции модуля через Apache Spark. В качестве основы модуля был использован модуль Spark Streaming, входящий в состав Apache Spark. Для интеграции модуля с Apache Kafka с целью обмена данными с другими модулями применены встроенный в модуль Spark Streaming клиент и пакет kafka-python. Для реализации взаимодействия модуля с хранилищем метаданных использован модуль redis.

В ходе работы модуль производит подготовку БД и хранилища метаданных к хранению результатов фильтрации входящего потока данных.

```
def prepare_db(self):
    click = Client('stand_clickhouse-server')
    sql = """
        CREATE DATABASE IF NOT EXISTS filtered_data;
    """
    click.execute(sql)
    sql = """
        CREATE TABLE IF NOT EXISTS filtered_data.data_stream (
            ts UInt64,
            t Float32,
            eOpt Float32,
            K Float32,
            xOpt Float32,
            true_pos Float32,
            sensor_pos Float32
        ) Engine=Kafka('stand_kafka:9092', 'filtered_data', 'ch1', 'JSONEachRow');
    """
    click.execute(sql)
    sql = """
        CREATE TABLE IF NOT EXISTS filtered_data.data (
            created DateTime DEFAULT NOW(),
            ts UInt64,
            t Float32,
            eOpt Float32,
            K Float32,
            xOpt Float32,
            true_pos Float32,
            sensor_pos Float32
        ) Engine=MergeTree() Primary key created Partition by toYYYYMM(created) Order By created;
    """
    click.execute(sql)
    sql = """
        CREATE MATERIALIZED VIEW IF NOT EXISTS filtered_data.data_stream_mv TO filtered_data.data
        AS SELECT ts, t, eOpt, K, xOpt, true_pos, sensor_pos FROM filtered_data.data_stream;
    """
    click.execute(sql)

    rds = redis.Redis('stand_redis')
    rds.mset({'t': 0, 'xOpt': 0, 'eOpt': 50})
```

Рисунок 2.4.2 - Программный код для подготовки БД и хранилища метаданных к хранению результатов фильтрации входящего потока данных

После этого происходит инициализация подключения модуля к потоку данных, генерируемых математической моделью неточного GPS датчика.

```
# Setup connection to Kafka
spark = SparkSession \
    .builder \
    .master("local") \
    .appName("TestKalmanFilter") \
    .getOrCreate()

df = spark \
    .readStream \
    .format("kafka") \
    .option("kafka.bootstrap.servers", "stand_kafka:9092") \
    .option("subscribe", "nano-satellite") \
    .option("startingOffsets", "earliest") \
    .load() \
    .selectExpr("CAST(value AS STRING)")

query = df.writeStream.foreach(ForeachWriter()).start()
query.awaitTermination()
```

Рисунок 2.4.3 - Инициализация подключения модуля к входящему потоку данных

Обработка данных из потока включает в себя три этапа:

- создание подключений к Apache Kafka для записи потока данных с результатами фильтрации, а также подключения к хранилищу метаданных;
- чтение данных из входящего потока, выполнение фильтрации и сохранение потока с результатами обратно в Apache Kafka, запись промежуточных данных в хранилище метаданных;
- разрыв соединений с Apache Kafka и хранилищем метаданных в случае возникновения ошибок.

```
class ForeachWriter:

    def open(self, partition_id, epoch_id):
        self.producer = KafkaProducer(bootstrap_servers=['stand_kafka:9092'],
                                     value_serializer=Lambda x:
                                     json.dumps(x).encode('utf-8'))
        self.rds = redis.Redis('stand_redis')
        return True

    def process(self, row):
        # constants block
        a = 0.1
        sigmaPsi = 0.1
        sigmaEta = 5

        # getting initial values
        t = float(self.rds.get('t'))
        x0pt = float(self.rds.get('x0pt'))
        e0pt = float(self.rds.get('e0pt'))

        # extract metrics from kafka stream
        row = str(row.value).split(',')
        true_pos = float(row[0])
        sensor_pos = float(row[1])

        # processing data
        e0pt = math.sqrt(math.pow(sigmaEta, 2) * (math.pow(e0pt, 2) + math.pow(sigmaPsi, 2)) /
                        (math.pow(sigmaEta, 2) + math.pow(e0pt, 2) + math.pow(sigmaPsi, 2)))
        K = math.pow(e0pt, 2) / math.pow(sigmaEta, 2)
        x0pt = (x0pt + a * t) * (1 - K) + K * sensor_pos
        t += 0.5

        # format dict with results
        res = {
            'ts': int(round(time.time() * 1000)),
            't': t,
            'e0pt': e0pt,
            'K': K,
            'x0pt': x0pt,
            'true_pos': true_pos,
            'sensor_pos': sensor_pos
        }

        # save results
        self.producer.send('filtered_data', value=res)
        self.rds.mset(res)

    def close(self, error):
        print(error)
        self.producer.close()
```

Рисунок 2.4.4 - Фильтрация входящего потока данных

3 Экспериментальные исследования алгоритмов обработки телеметрической информации на базе алгоритмов Калмановской фильтрации

3.1 Платформа для проведения эксперимента

В рамках работы над данной диссертацией основным программным модулем для обработки телеметрической информации является реализация фильтра Калмана. Для проведения эксперимента необходимо наличие двух компонентов:

- источника данных - математической модели, имитирующей неточный GPS датчик, а также истинное положение объекта;
- программного модуля с фильтром Калмана, в котором будет прописан закон изменения положения рассматриваемого объекта.

В качестве примера подобного модуля рассмотрим описанный в пункте 2.2 пример с фильтрацией показаний гипотетического GPS датчика для случая равноускоренного прямолинейного движения по одной оси. В таком случае уравнение, описывающее закон изменения координаты объекта, x будет выглядеть следующим образом:

$$x_{k+1} = x_k + a * \Delta t \quad (19)$$

Однако в случае рассмотрения реального объекта невозможно предусмотреть и смоделировать все явления, оказывающие влияние на рассматриваемый объект. Следовательно, изменение координат реального объекта всегда будет отличаться от расчетного, а, значит, на него будет влиять некоторая величина ξ_k :

$$x_{k+1} = x_k + a * \Delta t + \xi_k \quad (20)$$

Помимо уравнения, описывающего движение, также необходимо смоделировать показания неточного GPS датчика z с некоторой погрешностью равной η :

$$z_k = x_k + \eta_k \quad (21)$$

Разработанный программный модуль, реализующий математическое моделирование движения объекта и показания GPS датчика, приведен на рисунке 3.1. Программный модуль, реализующий фильтр Калмана для рассматриваемого объекта, подробно описан в разделе 2.4.

```

N=100 # number of samples
a=0.1 # acceleration
sigmaPsi=1
sigmaEta=50
k=[i for i in range(1,101)]
x=[i for i in range(1,101)]
z=[i for i in range(1,101)]
x[0]=0
z[0]=x[0]+np.random.normal(0,sigmaEta)
for t in range(1,N-1):
    x[t+1]=x[t]+a*t+np.random.normal(0,sigmaPsi)
    z[t+1]=x[t+1]+np.random.normal(0,sigmaEta)
plt.plot(k,z,label='measurement')
plt.plot(k,x,label='true')
plt.legend()
plt.show()

```

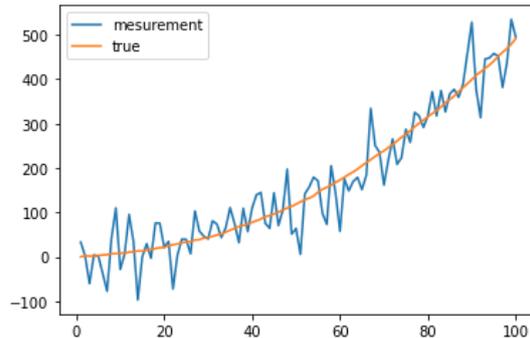


Рисунок 3.1.1 - Программный модуль, реализующий математическое моделирование движения объекта и показания GPS датчика

3.2 Применение фильтра Калмана для математической модели одноосевого равноускоренного движения материальной точки

В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры:

- показания неточного датчика GPS, полученные в результате его математического моделирования;
- истинное положение объекта, полученное в результате математического моделирования;
- положение объекта согласно отфильтрованному значению показаний неточного датчика GPS.

Полученные данные были записаны в БД разработанной ИС, а затем визуализированы в виде графиков при помощи инструмента, интегрированного в ИС. Из получившегося графика можно наблюдать возрастание значения координаты, отражающей положение объекта, что свидетельствует о корректной работе разработанных и запущенных программных модулей и ИС в целом. Однако в силу большого количества измерений, а также незначительного в абсолютных цифрах среднего за одну секунду отклонения показаний датчика от реального положения объекта визуализация динамики изменения положения объекта на рисунке 3.2.1 не является показательной.

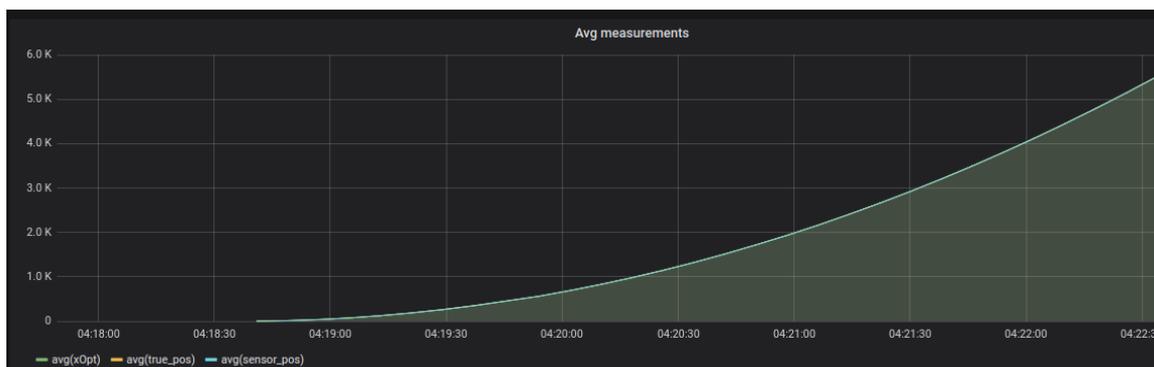


Рисунок 3.2.1 - Динамика изменения положения объекта согласно трем показателям с течением времени

В целях повышения информативности визуализации создан производный график, отражающий значение максимального расхождения показаний датчика и результатов фильтрации показаний от истинного положения объекта. Также на график нанесены линии, отмечающие нулевое расхождение и коридор в 4 единицы. График приведен на рисунке 3.2.2.

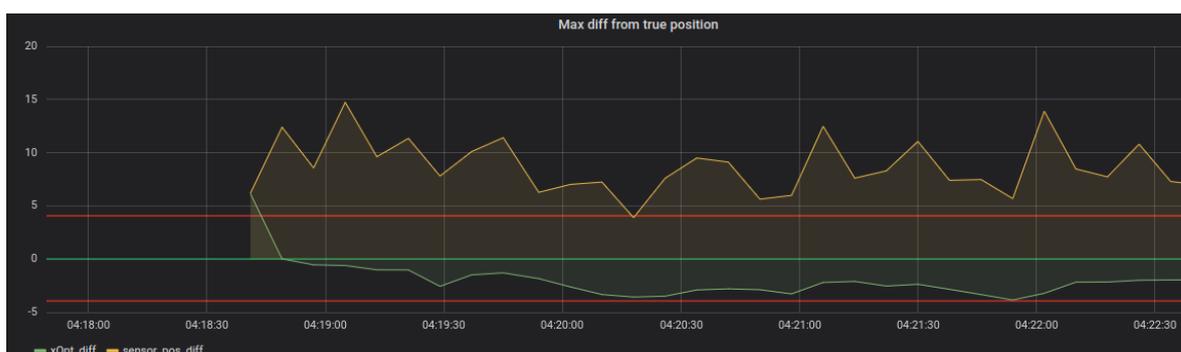


Рисунок 3.2.2 - Максимальное расхождение показаний датчика и результатов фильтрации показаний от истинного положения объекта

3.3 Анализ результатов эксперимента

В ходе проведенного эксперимента установлен факт работоспособности разработанной системы. ИС успешно справилась с возложенными на нее задачами по согласованному запуску различных программных модулей, маршрутизации потоков данных между запущенными модулями, обработке и хранению полученной в ходе эксперимента информации.

Основываясь на графиках, построенных с использованием визуализации в режиме, близком к реальному времени, удалось установить факт корректного запуска и штатной работы программных модулей. Благодаря наличию возможности взаимодействия с потоками информации в режиме, близком к реальному времени, удалось оперативно построить более

наглядный производный от исходного график, из которого стало четко видно влияние фильтра Калмана на отклонение показаний датчика от истинной координаты рассматриваемого объекта.

Применение программного модуля с фильтром Калмана позволило значительно сократить расхождение показаний датчика с истинной координатой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были определены основные требования и принципы разработки информационной системы для полунатурной обработки телеметрической информации. На их основе составлена структурная схема системы, согласно которой были выбраны ключевые компоненты.

Приведено обоснование использования ПО с открытым исходным кодом вместо разработки нового ПО исключительно для решения поставленной задачи. Описаны принцип работы, особенности и ключевые преимущества выбранных компонентов.

Отдельные компоненты были интегрированы в состав разрабатываемой ИС. Интеграция компонентов произведена с учетом попыток повышения отказоустойчивости и надежности системы. Реализована возможность масштабирования ИС путем практически линейного увеличения вычислительной мощности и доступных ресурсов в результате увеличения количества вычислительных машин в составе ИС.

Приведена схема интеграции сторонних программных модулей в состав предложенной ИС, необходимых для проведения полунатурных испытаний КА или систем, разработанных сторонними разработчиками и заказчиками испытаний. Составлена схема информационных потоков внутри ИС.

Проведенный эксперимент подтвердил работоспособность и способность ИС решать поставленные задачи в полном объеме. По результатам эксперимента получены показания каждого программного модуля, проведен анализ полученных показаний уже в процессе проведения испытаний благодаря возможности построения производных графиков. Все данные, зафиксированные в ходе эксперимента, надежно сохранены в базе данных и доступны для проведения повторного анализа в случае необходимости.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

Информационная система	ИС
Космический аппарат	КА
Малый космический аппарат	МКА
Ракетно-космическая техника	РКТ
Инерциальная навигационная система	ИНС
Программное обеспечение	ПО
Автоматизированное рабочее место	АРМ
База данных	БД

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Благова Е.О., Некрасов М.В., Пакман Д.Н. Проблемы мониторинга процессов управления космическими аппаратами в системе обработки телеметрии. – Решетневские чтения. 2015. - №19.
- 2 Арабаджи Т.Ш. Регистрация, обработка и контроль телеметрической информации. – Системы обробки інформації, 2007. – выпуск 9(67)
- 3 В.А. Лисейкин, В.В. Милютин, Г.Г.Сайдов, И.А.Тожокин.; Информационно-управляющие системы для стендовых испытаний ЖРД и двигательных установок – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2012. – 406 с.
- 4 Бизяев Р. В., Пущенко Н. Н., Калинин С. Ю. Информационная модель сопровождения наземной стендовой отработки ракетно-космической техники. – Программные продукты и системы. 2004. – №4.
- 5 Иванов Д.С., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю. Алгоритм оценки параметров ориентации малого космического аппарата с использованием фильтра Калмана // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2009. – № 48. – 32 с.
- 6 Дегтярёв А.А., Тайль Ш. Элементы теории адаптивного расширенного фильтра Калмана / Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – М., 2003. – №26. – 35 с.
- 7 Bak T. Spacecraft Attitude Determination – a Magnetometer Approach. / Ph.D. Thesis, Aalborg University, 1999 – 192 p.
- 8 Marques S. Small Satellites Attitude Determination Methods / Lisboa, Universidade tecnica de Lisboa, 2000 – 137 p.
- 9 Шустер М.Д. Использование фильтров Калмана для оценивания пространственной ориентации КЛА. AIAA Guidance, navigation and control, 82-0070R, 1983 – С.135-150
- 10 R. Clements. Stabilization and Control of Small Satellites / Portugal, Instituto De Sistemas e Robotica, 1999 – 50 p.
- 11 M.Majji, D.Mortari. Quaternion Constrained Kalman Filter. Galveston, AIAA Space Flight Mechanics Meeting, AAS 08-215, 2008, 32 p.
- 12 Steyn W.H. Full Satellite State Determination from Vector Observations / Department of Electronic Engineering, University of Stellenbosch Stellenbosch, South Africa, 1987 – 12 p.
- 13 Bar-Itzhack, I.Y. and Oshman, Y. Attitude Determination from Vector Observations: Quaternion Estimation / IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1985 – Vol.21 – No.1 – p128-135.
- 14 Техническая документация по Docker // электронная версия на сайте <https://docs.docker.com/>
- 15 Техническая документация по Apache Kafka // электронная версия на сайте: <https://kafka.apache.org/>
- 16 Техническая документация по Apache Spark // электронная версия на сайте: <https://spark.apache.org/>

17 Техническая документация по ClickHouse // электронная версия на сайте: <https://clickhouse.tech/docs/ru/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций

1 Алексеева Л.А., Суйменбаева Ж.Б., Сулеев Т.А. 3D-модель наноспутника «Политех-1» и расчет его физико-механических параметров с использованием ПО «SolidWorks» // Тезисы докладов международной научной конференции «Математические методы и современные космические технологии», посвященной 80-летию академика У.М. Султангазина. - Алматы, 2016. - С. 193-194.

2 Гусейнов С.Р., Сулеев Т.А. Моделирование массо-габаритных параметров НС в среде «SolidWorks» для функциональной отработки бортовых систем управления на стендовой базе // Труды международных Сатпаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана». - Алматы, 2016. - С. 160-165.

3 Б.Т. Суйменбаев, Л.А. Алексеева, Г.Т. Ермолдина, Ж.Б. Суйменбаева, С.Р. Гусейнов, А.М. Бапышев, Т.А. Сулеев. Разработка компьютерной модели управления движением КА в гравимагнитном поле Земли в системе Matlab-Simulink // Труды международных Сатпаевских чтений 2017 «Научное наследие Шахмардана Есенова», Алматы, 2017.

4 Ж.Б. Суйменбаева, Т.А. Сулеев, С.Р. Гусейнов, А.М. Бапышев, А.Е. Аден. Применение микроконтроллеров Arduino для отработки алгоритмов управления наноспутником на стендовой базе // Труды международных Сатпаевских чтений 2017 «Научное наследие Шахмардана Есенова», Алматы, 2017.

5 Т.А. Сулеев. Опытная отработка систем ориентации на стендовой базе КазНИТУ // Труды международных Сатпаевских чтений 2019, Алматы, 2019.