

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЩЕРБОВ ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ

**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ
ДАНЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Паслён В.В.

Донецк – 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	13
1.1 Аналитический обзор состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов.....	13
1.2 Анализ категорий траекторий и способов их описания.....	17
1.3 Анализ существующих методов и алгоритмов обработки данных траекторных измерений.....	20
1.4 Выводы.....	30
2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	31
2.1 Построение и исследование структур базисных функций.....	31
2.1.1 Построение и исследование структур линейно независимых базисных функций.....	31
2.1.2 Построение и исследование структур Λ -ортогональных базисных функций.....	38
2.2 Определение начального приближения на первом шаге ЛЛС и максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома.....	44
2.2.1 Построение итеративного алгоритма для определения статистической оценки вектора коэффициентов сглаживающего полинома.....	44
2.2.2 Определение начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания.....	46
2.2.3 Определение максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома.....	48
2.2.4 Исследование точности построения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома.	51

2.3 Разработка и исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома.....	54
2.4 Разработка алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.....	61
2.5 Выводы.....	65
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	67
3.1 Критерии оценки функционирования алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.....	67
3.2 Методика и условия проведения экспериментальных исследований.....	71
3.3 Экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов в нормальных условиях работы.....	75
3.3.1 Анализ качества и эффективности работы алгоритмов при некоррелированных ошибках измерений.....	75
3.3.2 Анализ качества и эффективности работы алгоритмов при коррелированных ошибках измерений.....	84
3.4 Экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений...	86
3.4.1 Методика проведения экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений.....	86
3.4.2 Анализ функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений.....	89
3.5 Выводы.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	117

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Развитие систем сбора и обработки информации об объектах, перемещающихся в пространстве по стохастическим траекториям, например, маневрирующих ракетно-космических систем, летательных аппаратов (ЛА), придает особую актуальность вопросам повышения точности и достоверности полученных результатов измерений, а также вопросам обработки данных внешнетраекторных измерений.

Решение данных задач осуществляется в траекторных измерительно-вычислительных комплексах, которые по полученным данным от внешних траекторных измерительных средств, на основе существующих алгоритмов, осуществляют обработку получаемой информации.

Развитие новых технологий и общая компьютеризация процессов обработки создали предпосылки необходимости применения алгоритмов, входящих в математическое и программное обеспечение систем автоматического сбора и обработки информации, при определении параметров положения ЛА в пространстве. В случае отсутствия точной и достоверной информации о траектории движения ЛА возможно принятие неправильного решения о характеристиках испытуемого объекта или качестве работы его бортовых пилотажно-навигационных комплексов, что в дальнейшем может привести к негативным последствиям при его испытаниях и эксплуатации.

На начальном этапе обработки траекторной информации широко применялись простые методы, суть которых сводилась к аналитическому определению точки пересечения трех поверхностей положения [1]. Используемые алгоритмы обработки имели ряд недостатков: отсутствие универсальности методов; наличие обширных зон низкой точности; отсутствие учета пространственной и временной избыточности измерений, что приводило к снижению точности и достоверности получаемых результатов [1].

На следующем этапе развития алгоритмов обработки данных траекторных измерений появились методы, которые осуществляли последовательную

обработку избыточных данных: вначале временную, а затем пространственную (и наоборот). Однако, данные методы, так же, как и простые, имели ряд своих недостатков [1]. Исходя из этого, возникла необходимость в разработке методов и алгоритмов, которые бы позволили осуществлять совместную реализацию (обработку) пространственной и временной избыточности получаемых данных.

Определенные трудности в совместной реализации пространственной и временной избыточности данных измерений обусловлены в первую очередь нелинейностью решаемой задачи и большим объемом многопараметрических величин, подлежащих обработке.

Таким образом, повышение точности определения пространственного положения ЛА, в результате разработки методов и алгоритмов системного анализа и решения задач, направленных на повышение точности и достоверности оценки работы бортовых пилотажно-навигационных комплексов, является актуальной научно-технической задачей и имеет практическое значение.

Степень разработанности темы исследований. С целью систематизации работ по обработке данных траекторных измерений в 1952 году в СССР при Институте ВВС ВМФ СССР была создана служба внешнетракторных измерений. Создание службы внешнетракторных измерений позволило сосредоточить внешнетраекторные, радиотелеметрические, подводные измерения и обработку их результатов в одном подразделении, что улучшило организацию и качество выполняемых работ.

На начальном этапе сглаживание осуществлялось графо-аналитическим способом с применением простых методов и алгоритмов, которые использовали минимальный необходимый набор первичных координат ($m = 3$).

В дальнейшем, с развитием научно-технического процесса, арсенал простых методов пополнялся. Угломерные и угломерно-дальномерные методы дополнились дальномерными, разностно-фазовыми, дальномерно-разностно-фазовыми и другими методами. Совершенствовались также методы определения и учета систематических ошибок. Разработка в начале 60-х годов пеленгационных методов оценки местоположения объекта по информации минимально-

избыточного объема ($m = 4$) позволила повысить точность и достоверность получаемых результатов, что в свою очередь определило их широкое применение [1-8].

Следующим этапом совершенствования методов обработки траекторной информации является обобщенный (статистический) метод. За основу данного метода был взят метод наименьших квадратов. Вычисление статистической оценки пространственного положения ЛА осуществлялось помощью рекуррентного соотношения через ряд последовательных приближений. Применение данного метода позволило при проведении обработки траекторной информации использовать пространственную избыточность данных измерений [1, 9].

Дальнейшее развитие обобщенных методов обработки данных траекторных измерений позволили в процессе расчетов траекторий использовать не только пространственную, но и временную избыточность получаемых данных измерений. При этом в процессе вычислений последовательно использовались данные временной, а потом пространственной избыточности или же наоборот [1, 3, 9, 10].

Совершенствование и развитие методы обработки данных ВТИ получили в работах профессора Огородничука Н.Д. и его учеников: Кушнарёва П.И., Глушкова А. Г., Лавракова В.М., Парасича Ю. Н., Паслёна В.В., Шахбазяна А. Г.

Результатами исследований явились: методы оперативного контроля и самоконтроля точности траекторных измерительных средств; методы, позволившие повысить эффективность адаптивных алгоритмов сглаживания, базирующихся на различных критериях оптимальности; методы, позволяющие обеспечивать возможность обнаружения и нейтрализации сбоев, а также грубых ошибок траекторных измерений; методы учитывающие влияние автокорреляции ошибок измерений на точность обработки данных траекторных измерений.

Исследования по вопросам совершенствованию и реализации алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений обладающих пространственной и временной избыточностью, были продолжены в Донецком национальном техническом университете под руководством кандидата технических наук, доцента Паслёна Владимира Владимировича [1, 3, 9, 10].

Результаты исследований проходили апробацию и находили свое применение на сухопутном испытательном полигоне «Чауда» [1, 3, 9, 10].

Вопросы обработки данных траекторных измерений исследовались в работах как отечественных: Жданюка Б.Ф. [2], Агаджанова П.А. [6], Булычева Ю.Г. [8], Еналеева С.Ф. [11], так и зарубежных авторов: Тьюки Дж. [12], Хьюбера П. [13] и многих других.

Целью диссертационной работы является повышение точности и достоверности определения вторичных координат пространственного положения ЛА в траекторных измерительно-вычислительных комплексах за счет применения разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие основные **задачи**:

1. Построить и исследовать структуры линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций.

2. Предложить и обосновать способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

3. Разработать и исследовать методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома.

4. Разработать и исследовать алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

5. Провести анализ и экспериментальное исследование разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их функционирования в нормальных условиях работы и устойчивости к аномальным ошибкам измерений на основе разработанной системы показателей эффективности и качества.

Объектом исследования являются автоматизированные процессы послеполетной обработки данных траекторных измерений в траекторных измерительно-вычислительных комплексах.

Предметом исследования являются алгоритмы обработки данных измерений в траекторных измерительно-вычислительных комплексах.

Методология и методы исследования. Основные результаты диссертационной работы опираются на фундаментальные исследования в области: системного анализа, теории управления, теории вероятностей и математической статистики, численных методов решения уравнений, теории матриц.

Область исследования. Диссертационная работа соответствует пунктам 4, 5 паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Построены и исследованы структуры линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций, отличающиеся от известных структур, применяемых в алгоритмах обработки данных траекторных измерений тем, что позволяют проводить совместную обработку различных типов измеряемых первичных координат местоположения испытываемых объектов, получаемых от внешнетраекторных измерительных средств, для получения независимых оценок вектора коэффициентов сглаживающего полинома (пункт 5 паспорта специальности 2.3.1.), страницы 31-43 диссертационной работы.

2. Предложен и обоснован способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания, отличающийся от ранее разработанных тем, что на последующем шаге локально-скользящего сглаживания данных измерений нет необходимости нахождения начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, а используется значение, которое было получено на предыдущем шаге локально-

скользящего сглаживания (пункт 5 паспорта специальности 2.3.1.), страницы 44-53 диссертационной работы.

3. Разработаны и исследованы методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, отличающиеся от ранее разработанных тем, что предложенные методы позволяют осуществлять нелинейное сглаживание данных измерений как с оптимизацией степени сглаживавшего полинома, так и с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (пункт 4 паспорта специальности 2.3.1.), страницы 54-60 диссертационной работы.

4. Разработаны и исследованы алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, отличающиеся от ранее разработанных тем, что позволяют осуществлять совместную обработку данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью, что позволило повысить точность и достоверность определения вторичных параметров положения испытываемых объектов (пункт 4 паспорта специальности 2.3.1.), страницы 61-64 диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений, которые автоматически приспособляются к стохастической траектории испытываемого объекта на каждом шаге локально-скользящего сглаживания. Реализация в алгоритмах решения, устойчивого к аномальным ошибкам измерений, позволяет осуществлять обработку полученной первичной траекторной информации без осуществления предварительной отбраковки аномальных данных измерений. Полученные результаты вычислительного эксперимента показали преимущества разработанных алгоритмов по сравнению с существующими аналогами и могут быть использованы для слепополетной обработки данных траекторных измерений в траекторном измерительно-вычислительном комплексе.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается тем, что предлагаемые положения базируются на

анализе практики, обобщении передового опыта и построены на известных исследованиях и теоретических методах; строгостью математических выкладок; публикациями в рецензируемых изданиях, апробацией работы на международных конференциях, проведением практических исследований с использованием современных инструментов сбора и обработки данных, с соответствующим подтверждением актов о внедрении результатов и практическом использовании в ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Реализация и внедрение результатов работы. По результатам работы получены патент на изобретение и декларационный патент на полезную модель. Результаты диссертационного исследования использованы в двух научно-исследовательских работах в ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет». Разработанный алгоритм и программное обеспечение внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структуры линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций, позволяющие осуществлять совместную обработку различных типов измеряемых первичных координат испытываемых объектов, получаемых от внешнетраекторных измерительных средств.

2. Способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, обеспечивающий начало итерационного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания.

3. Методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, осуществляющие нелинейное сглаживание данных измерений с оптимизацией степени сглаживавшего полинома или с оптимизацией структуры сглаживающего полинома, что позволяет уменьшить время, затрачиваемое на обработку информации.

4. Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, осуществляющие совместную обработку данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью,

что позволяет повысить точность и достоверность определения вторичных параметров положения испытываемых объектов.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения национальной безопасности в условиях современности» (2020 г., г. Донецк); Международной научно-практической конференции «Университетские микроспутники – перспективы и реальность» (2006 г., Днепропетровск), Международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос» (2006 г., Днепропетровск) и других.

Публикации. Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 научных изданиях, из них: 3 – в научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 3 – в научных изданиях, включенных в перечень ВАК ДНР, 1 – в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Украины, 1 – патент на изобретение; 1 – патент на полезную модель; 2 – в других изданиях.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание работы, разработаны и получены лично автором или при его непосредственном участии. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит определяющая роль при решении задач построения и исследования структуры и параметров систем линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций, обосновании способа выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, разработке и исследовании алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, оценки эффективности и качества работы разработанных алгоритмов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из: введения, трех разделов, заключения, изложенных на 105 листах, содержит 20 рисунков, 14 таблиц, 105 наименований библиографии, 4 приложений, списка сокращений и условных обозначений. Полный объем диссертационной работы составляет 145 листов.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Глава 1 посвящена анализу состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов, назначения входящих в него систем и требования к выполняемым задачам, существующих категорий траекторий и способов их описания, методов и алгоритмов обработки данных траекторных измерений, применявшихся и применяемым в автоматизированных процессах слепополетной обработки данных траекторных измерений в траекторных измерительно-вычислительных комплексах.

Результатом главы является определение цели и постановка задач диссертационного исследования.

1.1 Аналитический обзор состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов

Испытания как вид научно-технической деятельности преследуют цель – получить ответ на вопрос о пригодности объекта испытаний к штатной эксплуатации путем проведения цикла экспериментов на всех этапах проектирования. Построение модели и эксперимент находятся в циклическом взаимодействии. По сути, эксперимент с объектом испытания проводится для того, чтобы уточнить, конкретизировать имеющиеся представления, выраженные в той или иной модели, чаще в форме математической модели, а постановка эксперимента определяется, исходя из необходимости совершенствования имеющейся модели.

Испытания – это сложный, многоэтапный и ответственный процесс интеллектуальной, организационно-технической деятельности, направленной на выдачу заключения о пригодности объекта испытаний к штатной эксплуатации.

Конечная задача любых испытаний - это получение наиболее полного понимания объекта испытаний, его свойств и поведения.

Быстрое развитие ЛА и маневрирующих ракетно-космических систем придает особую актуальность задачам повышения точности измерений, достоверности получаемых результатов, сокращению сроков обработки данных траекторных измерений.

С целью траекторных измерений при проведении испытаний разрабатываемых маневрирующих в пространстве систем и объектов создаются траекторные измерительно-вычислительные комплексы (ТИВК) [1-9, 14, 15].

Типовая структура ТИВК [1, 4, 5, 9] представлена на рисунке 1. Структура комплекса включает: внешнетраекторные измерительные средства (ВТИС); систему автоматического съема и передачи информации (САСПИ); систему единого времени (СЕВ); вычислительную систему (ВС).

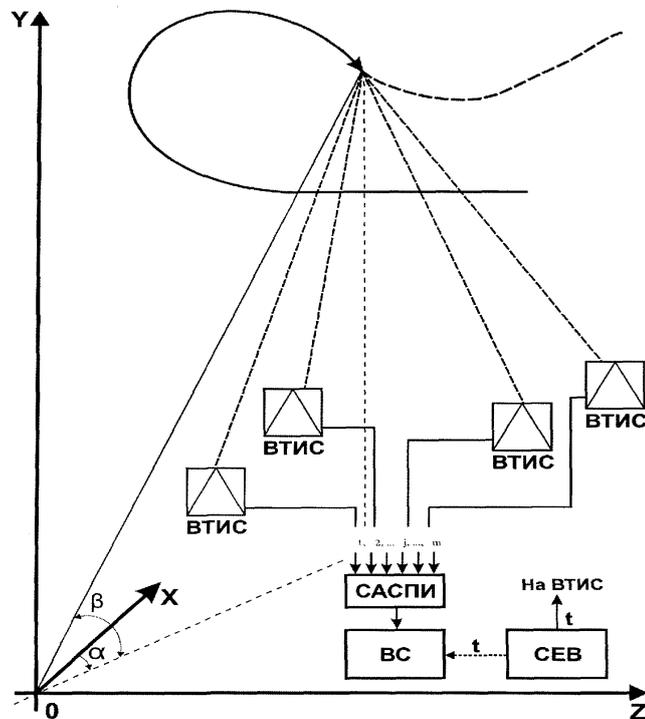


Рисунок 1 – Структурная схема ТИВК

ВТИС являются станциями или устройствами для контроля различных типов первичных координат летательного аппарата (например, дальности R , азимута α , угла места β). В зависимости от числа контролируемых параметров станции могут быть одноканальными или многоканальными. Примерами последних являются радиолокационные станции (РЛС), кинотеодолитные станции (КТС). Многоканальные станции, предназначенные для измерения первичных координат и скоростей, называют также многопараметрическими [6].

Для обработки данных измерений важными характеристиками ВТИС являются тип и точность измерений контролируемых первичных параметров и фиксируемых в пространстве поверхностей положения (поверхностей равных значений параметров).

САСПИ производят дискретизацию измеряемых аналоговых величин (углов, дальностей и др.) по времени, квантование по уровню [16] и передачу по каналам связи непосредственно в центр обработки информации, а также запись на носитель информации.

СЕВ осуществляет формирование шкалы единого времени и взаимную временную привязку первичной информации от различных измерительных станций [17].

ВС осуществляет преобразование первичной информации в конечные результаты в соответствии с заложенными в их память алгоритмами, реализующие определенные методы обработки. К ВС предъявляются следующие требования [4, 18]:

- достоверность и точность результатов вычислений;
- скорость проводимых вычислений;
- оперативность управления процессом обработки;
- реализуемость алгоритмов обработки данных измерений для выбранных методов;
- представление результатов обработки в удобном виде для пользователя.

Обязательными составляющими ВС являются:

- ЭВМ для специализированной первичной и экспресс-обработки траекторной информации;

- высокопроизводительные ЭВМ для основной обработки траекторной информации;

- аппаратура сопряжения с САСПИ.

В зависимости от целей и задач, выполняемых ТИВК, ВС может комплектоваться и другими необходимыми системами и оборудованием.

Центр обработки информации может быть связан с измерительными пунктами каналами передачи информации, предназначенными для ускорения процесса обработки.

Проведенный анализ назначения, состава и структуры типового ТИВК приводит к выводу о том, что для качественного решения выполняемых задач, точность и достоверность результатов измерений получаемых в процессе обработки в ТИВК должна быть в несколько раз выше точности систем управления ЛА.

Высокие требования к точности и достоверности обусловлены тем, что результаты траекторных измерений используются для оценки тактико-технических характеристик ЛА и маневрирующих ракетно-космических систем.

Повышение точности и достоверности определения вторичных координат пространственного положения испытываемых объектов в ТИВК достигается:

- совершенствованием материально-технического обеспечения измерительно-вычислительного комплекса;

- улучшением методов определения и учета систематических ошибок;

- повышением качества и эффективности применяемых алгоритмов обработки данных траекторных измерений [1, 19].

Разработка новых методов и алгоритмов с целью повышения точности и достоверности определения вторичных координат пространственного положения ЛА в траекторных измерительно-вычислительных комплексах за счет применения разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных

многопараметрических измерений является целью диссертационного исследования.

Для начала выполнения поставленных в диссертационном исследовании задач необходимо провести анализ существующих категорий траекторий испытываемых объектов и способы их описания, а также существующих методов и алгоритмов обработки данных траекторных измерений. Данный анализ будет проведен в следующих параграфах.

1.2 Анализ категорий траекторий и способов их описания

Для обеспечения полноты проводимых исследований необходимо проанализировать категории траекторий испытываемых объектов и способы их описания.

Траекторией движения называют зависимость положения центра масс (или какой-либо другой точки) объекта от времени в принятой системе координат. В качестве последней в зависимости от решаемой задачи могут быть использованы прямоугольная декартова, прямоугольная сфероидическая, цилиндрическая, местная (топоцентрическая), геоцентрическая, гелиоцентрическая или другие системы [6, 10, 20, 23]. Траектория считается известной, если в любой момент времени t заданного временного интервала известен вектор текущего положения объекта $r(t)$. В общем случае траекторию можно представить совокупностью некоторого числа параметров-компонент вектора A , позволяющих с достаточной точностью аппроксимировать движение объекта на данном временном интервале. Вид и количество параметров зависит прежде всего от характера полета объекта на данном участке и совокупности действующих на него сил. В зависимости от этого траектории делят на две основные категории:

- детерминированные траектории (рисунок 2);
- стохастические (случайные) траектории (рисунок 3).

Каждая из названных категорий в свою очередь делится на классы, отличающиеся составом траекторных параметров [6, 10, 20, 23].

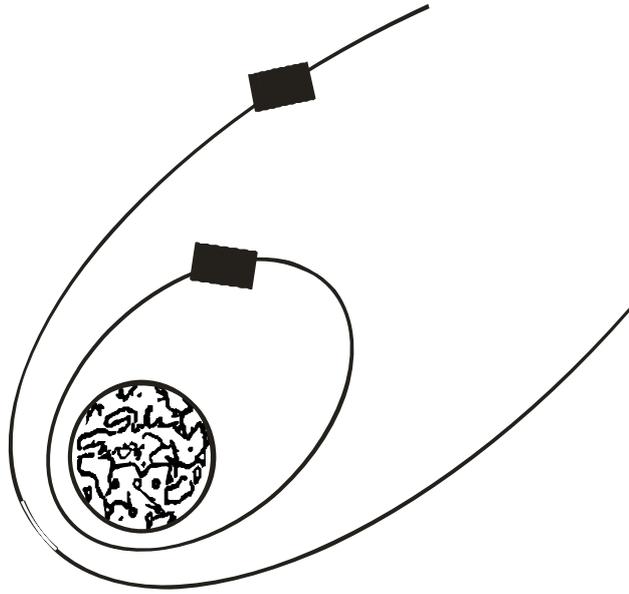


Рисунок 2 – Детерминированные траектории

Траекторию полета принято считать детерминированной, если на заданном временном интервале совокупность действующих на объект сил известна с достаточной степенью точности, не приводящей к существенным ошибкам при расчете траекторий. Благодаря этому каждый класс детерминированных траекторий может быть задан ограниченным и заранее известным числом траекторных параметров. Примерами классов детерминированных траекторий являются эллиптические, параболические и гиперболические орбиты космических аппаратов.

Стохастическими являются траектории, при расчете которых нет полной информации о силах, действующих на ЛА, или эти силы известны с существенными ошибками. Вследствие этого для стохастической траектории невозможно заранее установить количество траекторных параметров, необходимое для его описания на заданном участке полета с допустимой или минимальной погрешностью. Примерами стохастических траекторий являются траектории маневрирующих ракетно-космических систем [1, 2], ЛА и других управляемых

объектов, движущихся в воздухе, на воде и под водой, где точно учесть силы тяги и сопротивление внешней среды практически невозможно.

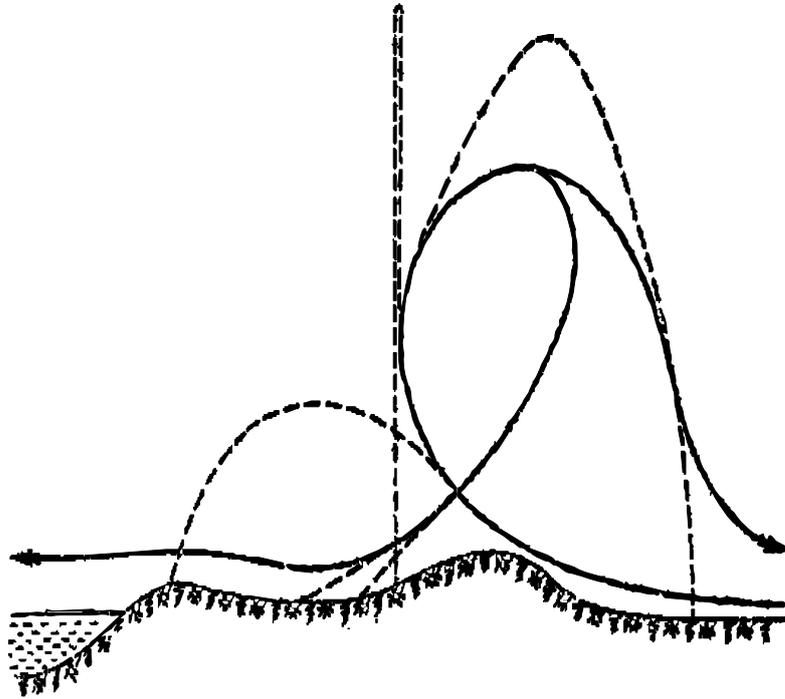


Рисунок 3 – Стохастические траектории

Принадлежность траектории к той или иной категории определяет рациональный способ ее описания. Для детерминированных траекторий является рациональным и нашел широкое распространение способ их описания с помощью системы дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$m\ddot{\mathbf{r}}(t, A) = F_{\Sigma} \quad (1)$$

где m – масса объекта; $\ddot{\mathbf{r}}$ – вектор мгновенного ускорения центра масс; t – текущее время; A – вектор траекторных параметров (или начальных условий); F_{Σ} – суммарный вектор всех действующих на объект сил.

Конкретный вид системы (1) и начальные условия A , вычисленные путем сопоставления результатов интегрирования системы (1) с данными измерений, полностью определяют форму траектории.

Для рассматриваемых в настоящей работе стохастических траекторий более рациональным является полиномиальное описание типа

$$x(t, A) = \sum_{k=0}^m a_k \varphi_k(t), \quad (2)$$

где x – координатная составляющая вектора положения; a_k – компонент вектора траекторных A -параметров (вектора коэффициентов полинома); m – максимальная степень сглаживающего полинома; $\varphi_k(t)$ – система обобщенных линейно независимых базисных функций, t – время.

Полиномиальный способ описания стохастической траектории (2) более удобен в вычислительном отношении, так как непосредственно (без интегрирования системы дифференциальных уравнений) позволяет получить информацию о траектории движения объекта по данным измерений, и главное, не требует информации о силах, действующих на объект, которые для данной категории траекторий неизвестны и часто сами подлежат определению в ходе траекторных измерений.

При этом необходимо учитывать, что получаемые от ВТИС данные траекторных измерений зависят от типа применяемых систем и принципа их работы. Перейдем к анализу особенностей обработки данных траекторных измерений.

1.3 Анализ методов и алгоритмов обработки данных внешнетраекторных измерений

В параграфе 1.1 был произведен анализ состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов. Как было отмечено в состав ТИВК входят ВТИС, количество которых, а также измеряемые первичные

параметры местоположения испытуемого объекта, зависят от задач проводимых испытаний.

ВТИС расположены в различных точках пространства с точно определенными координатами местоположения и проводят измерения первичных координат ЛА в точно определенные моменты времени t [22-26]. Получаемые от ВТИС данные траекторных измерений представляют собой множество измеренных величин ξ .

В пределах интервала сглаживания n многопараметрический вектор измерений ξ состоит из полученных в результате измерений первичных координат ЛА (для РЛС такими данными являются: дальность R , азимут α , угол места β) [1, 2, 22, 23]:

$$\xi^T = \left| \xi_1^1 \dots \xi_i^1 \dots \xi_n^1 \dots \xi_1^j \dots \xi_i^j \dots \xi_n^j \dots \xi_1^N \dots \xi_i^N \dots \xi_n^N \right|, \quad (3)$$

где ξ_i^j – данные измерений j первичной координаты в i момент времени;
 $j = 1, \dots, N; i = 1, \dots, n$.

Каждый элемент ξ_i^j , входящий в множество (3), представляет собой сумму элементов:

$$\xi_i^j = \xi_{iuc}^j + \Delta \xi_i^j,$$

где ξ_{iuc}^j – неизвестное истинное значение измеряемой первичной координаты;

$\Delta \xi_i^j$ – неизвестное значение ошибки измерений.

Благодаря совместным измерениям, проводимым ВТИС, создается временная и пространственная избыточность полученной информации о местоположении объекта. [1, 6].

Под временной избыточностью понимается информация, содержащая параметры траекторных измерений пространственного положения испытываемого объекта, полученные от всех работающих при проведении испытаний ВТИС. Временная избыточность связана с высоким темпом съема информации, который обусловлен необходимостью быть в готовности зарегистрировать наиболее динамичные участки траектории, различные характерные явления и развитие возможных аварийных ситуаций.

Под пространственной избыточностью также понимается информация, содержащая параметры траекторных измерений пространственного положения испытываемого объекта, полученные от всех работающих при проведении испытаний ВТИС. Но при этом, пространственная избыточность явилась следствием многократного дублирования измерений различными средствами, и первоначально создавалась с целью повышения надежности измерений.

Впоследствии, временную и пространственную избыточность, стали использовать для повышений точности результатов траекторных измерений.

Необходимо отметить, что при анализе траекторных измерениях обработка данных в реальном масштабе времени не является обязательной. Данная особенность обработки траекторной информации позволяет применять более сложные методы и алгоритмы, обеспечивающие реализацию избыточности измерений в интересах повышения точности и достоверности конечных результатов.

Прежде, чем перейти к анализу существующих методов и алгоритмов обработки данных траекторных измерений, необходимо рассмотреть способы сглаживания полученных данных, которые применяются в этих методах и алгоритмах.

Сглаживание позволяет [3, 26, 27]:

- производить отбраковку грубых ошибок измерений (сбоев);

- уменьшать влияние быстро флуктуирующих ошибок измерений;
- оценить производные измеряемых и вычисляемых параметров.

Следует отметить, что сглаживание это мера борьбы с быстро флуктуирующими ошибками измерений, время корреляции которых значительно меньше интервала сглаживания.

В целом сглаживание представляет собой способ одновременной обработки избыточной информации, полученной на всей траектории. При применении метода статистической оценки стохастических траекторий возникает необходимость применения аппроксимирующих полиномов высокого порядка, что как следствие, приводит к усложнению процесса обработки и накоплению ошибок вычислений. Применение аппроксимирующих полиномов низкого порядка, также приводит к ошибкам вычислений за счет чрезмерного сглаживания.

В процессе обработки данных измерений стохастических траекторий, применение полиномов высокого порядка приводит к усложнению обработки и появлению ошибок вычислений, а снижение порядка аппроксимирующего полинома приводит к чрезмерному сглаживанию и как следствие, появлению ошибок вычислений.

Чтобы избежать вышеуказанных ошибок вычислений применяют один из способов локального сглаживания:

- кусочно-локальное сглаживание [2, 3];
- локально-скользящее сглаживание [3, 8];
- сплайновая обработка [31-36].

Кусочно-локальное сглаживание (КЛС) – представляет собой способ обработки полученной траекторной информации, при котором вся траектория движения наблюдаемого объекта разбивается на конечное число участков τ_c , соответствующих интервалам сглаживания. Данные измерений, полученные на каждом участке, сглаживаются независимо от других участков (рисунок 4) [3].

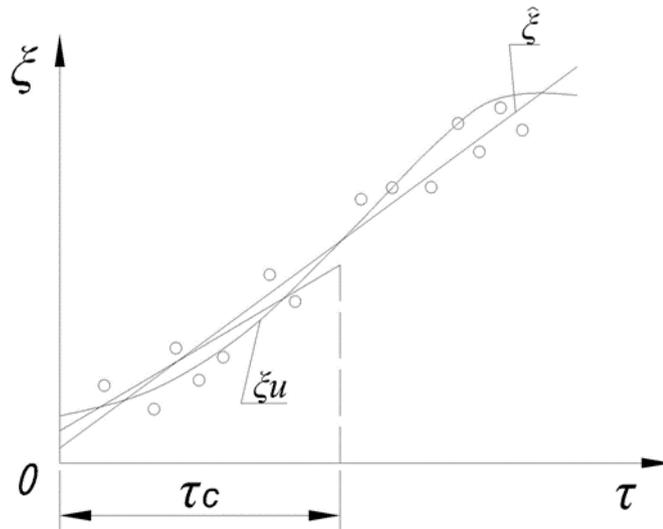


Рисунок 4 - Кусочно-локальное сглаживание траекторной информации по результатам внешнетраекторных измерений

Статистическая оценка траектории формируется из отрезков, полученных в результате сглаживания данных измерений на соответствующих участках. За счет использования в данном способе сглаживания полиномов невысокого порядка, время обработки данных измерений сравнительно невелико. Недостатком такого способа сглаживания являются разрывы на стыках участков сглаживания, что приводит к ошибкам определения координат контролируемого объекта [2, 3, 30].

Локально-скользящее сглаживание (ЛСС) – способ обработки полученной траекторной информации, при котором интервал сглаживания τ_c дискретно, с шагом $\tau_{ш}$ перемещается (скользит) в пределах интервала измерений τ_u (рисунок 5).

После завершения обработки информации на $h-1$ интервале сглаживания происходит сдвиг на очередной шаг. Это происходит за счет перемещения середины интервала сглаживания в соответствии с формулой:

$$\tau_{oh} = \frac{1}{2}\tau_c + h\tau_{ш},$$

где $h = 0, 1, \dots, \frac{\tau_u - \tau_c}{\tau_{ш}}$.

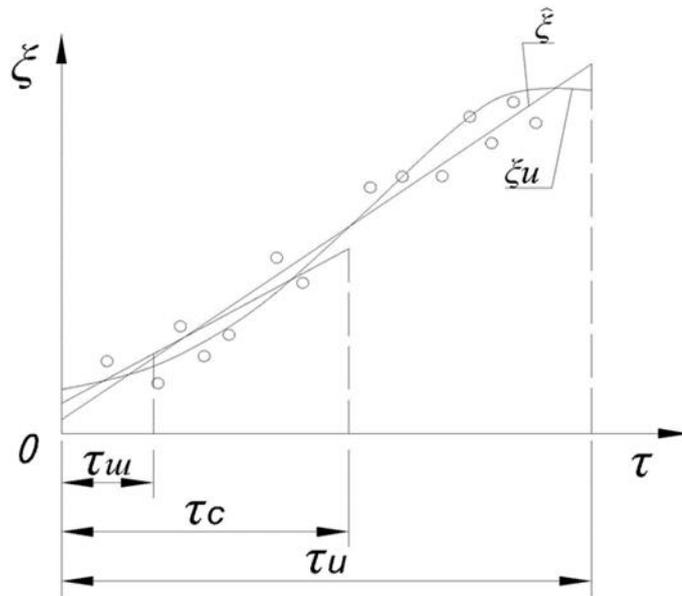


Рисунок 5 – Локально-скользящее сглаживание траекторной информации по результатам внешнетраекторных измерений

Для упрощения алгоритма обработки данных траекторных измерений на интервале сглаживания вводится местная система отсчета времени, начало которой совмещено с серединой интервала сглаживания. При этом взаимное соответствие между τ и t на интервале сглаживания h определяется выражением:

$$t = \tau - \tau_{oh} = \tau - \frac{1}{2}\tau_c = h\tau_{ш}.$$

При данном способе обработки траекторной информации на каждом шаге используется только та часть информации, которая находится в средней части интервала сглаживания, что позволяет получить наиболее точную информацию в сравнении со способом КЛС. В концах интервала траектории, используются все результаты измерений интервала сглаживания, что приводит к снижению точности получаемых результатов.

При уменьшении шага сглаживания $\tau_{ш}$ увеличиваются точность получаемых результатов и время обработки данных измерений [3, 8, 30].

Сплайновая обработка – способ кусочно-локального сглаживания данных измерений с выполнением дополнительных условий, обеспечивающих непрерывность сглаживающей функции на стыках участков. Сплайновая обработка приводит к повышению точности на стыках участков, но часто сопровождается ухудшением точности внутри интервала сглаживания [31-36].

На начальном этапе сглаживание данных внешнетраекторных измерений осуществлялось графо-аналитическим способом с применением простых методов и алгоритмов, которые использовали минимальный необходимый набор первичных координат ($m = 3$).

В дальнейшем, арсенал простых методов пополнялся. Угломерные и угломерно-дальномерные методы дополнились дальномерными, разностно-фазовыми, дальномерно-разностно-фазовыми и другими методами. Совершенствовались также методы определения и учета систематических ошибок. Определенным шагом вперед явилась разработка в начале 60-х годов пеленгационных методов оценки местоположения объекта по информации минимально-избыточного объема ($m = 4$) [1].

Развитие вычислительных систем дали толчок развитию новым методам и алгоритмам обработки данных внешнетраекторных измерений.

Применяемые сегодня в процессе обработки траекторной информации методы сглаживания основаны на базе:

- квадратичных полиномов [31, 45-47];
- тригонометрических рядов Фурье [47];
- ортогональных полиномов Чебышева [35, 48, 49];
- сплайн-приближения [31-34].

Эти методы и алгоритмы позволили ускорить обработку получаемой информации, а также повысить точность получаемых результатов сглаживания в сравнении с ранее рассмотренными методами и алгоритмами. Однако они не решили проблему использования в процессе обработки траектории движения ЛА имеющихся баз данных (временной и пространственной избыточности), и при этом

накладывали ограничения на выбор степени полинома и интервала сглаживания [1, 6].

Анализ особенностей различных способов сглаживания [2, 3] приводит к выводу о целесообразности применения локально-скользящего сглаживания, как наиболее общего и гибкого способа. Данный способ заключается в перемещении интервала сглаживания с заданным шагом в пределах интервала измерений. Как покажет дальнейшее исследование именно этот вид сглаживания целесообразно применять для обработки стохастических траекторий.

Оптимальное (по точности) сглаживание достигается методом наименьших квадратов (МНК) при априорно неизвестной структуре сглаживающего полинома [2, 3].

На основе критерия наименьших квадратов были разработаны обобщенный (статистический) метод и алгоритмы обработки траекторной информации [1, 8, 20, 27, 50]:

$$\hat{r}_{v+1} = \hat{r}_v + \Delta \hat{r}_v = \hat{r}_v + U_v^{-1} \sum_{j=1}^m \frac{b_{jv}}{\sigma_{jv}^2}, \quad (4)$$

где \hat{r}_v – v приближение вектора оценки положения объекта; $\Delta \hat{r}_v$ – v приращение приближения вектора оценки положения объекта для получения статистической оценки; U_v – симметричная матрица, составленная из

частных производных f_{jx}, f_{jy}, f_{jz} ; $\sum_{j=1}^m \frac{b_{jv}}{\sigma_{jv}^2}$ – сумма взвешенных векторных ошибок

поверхностей положения относительно v -го приближения оценки местоположения объекта.

Обобщенный метод и алгоритмы имеют ряд достоинств [35]:

- позволяют использовать при обработке внешнетраекторных данных измерений имеющуюся пространственную избыточность полученной информации;

- не зависят от типа и пространственного расположения ВТИС;
- позволяют осуществлять оперативный контроль и самоконтроль точности измерительных станций;
- предоставляют информацию для принятия решения о размещении ВТИС, с целью уменьшения зон с низкой точность проводимых измерений;
- эффективны против слабо и сильно коррелированных ошибок измерений;
- могут быть применены в адаптивных алгоритмах [1, 8, 20, 27, 50].

В дальнейшем, развитие получили методы и алгоритмы, которые в процессе обработки внешнетраекторной информации стали более полно использовать имеющуюся пространственную и временную избыточность [1, 8, 20, 27, 50].

По своей сути методы и алгоритмы осуществляли последовательную обработку имеющихся избыточных данных измерений - вначале пространственной, а потом избыточной или наоборот.

В первом случае, вначале обрабатываются несглаженные данные измерений положения ЛА, зарегистрированные в одни и те же моменты времени. При пересчете первичных координат во вторичные, происходит сжатие данных измерений, автокорреляция ошибок не учитывается. Полученные вторичные координаты сглаживаются полиномами невысокого порядка.

Во втором случае, для сглаживания данных измерений применяются полиномы более высокого порядка, при этом учитывается автокорреляция ошибок измерений, а пространственная избыточность и сжатие данных реализуется отдельно для каждого момента времени [1, 8, 20, 27, 50].

Сравнив эти два метода последовательного учета пространственной и временной избыточности, можно сделать следующие выводы о характеристиках алгоритмов последовательной обработки траекторной информации, построенных на основе этих методов:

- использование при обработке данных внешнетраекторных измерений пространственной и временной избыточности позволяет повысить точность определения пространственного положения ЛА;

- лучшие показатели качества и эффективности получаются, если на первом этапе происходит учет пространственной избыточности данных;
- применение метода последовательной обработки избыточной траекторной информации позволяет повысить точность вторичных координат в зависимости от геометрического фактора и степени избыточности данных [1, 8, 20, 27, 50].

В дальнейшем получили развитие методы адаптивного линейного сглаживания, которые при обработке данных внешнетраекторных измерений позволяли автоматически подстраивать степень и структуру сглаживающего полинома к изменяющейся форме стохастической траектории ЛА [3, 37, 51].

Применение разработанных методов и алгоритмов позволило улучшить точность и качество получаемых при обработке внешнетраекторной информации результатов за счет:

- автоматизации процесса при выборе степени и структуры сглаживающего полинома;
- применения способа локально-скользящего сглаживания;
- возможности осуществлять отбраковку грубых ошибок измерений и др [3, 37, 51].

Параллельно с рассмотренными методами и алгоритмами сглаживания данных внешнетраекторных измерений, проводились исследования на предмет использования для этих целей методов линейной фильтрации (Колмогоров, Кальман, Шеннон и др.). Однако данные методы не нашли своего применения на практике летных испытаний ЛА, так как больше подходят для траекторий большой протяженности (баллистических и космических) и при этом уступают в точности получаемых результатов послеполетной обработки траекторной информации ЛА в сравнении с методами сглаживания [2, 3, 6, 8, 20, 27, 42, 50, 51, 54-56, 59].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для обработки данных измерений стохастических траекторий, предпочтительно применять методы сглаживания, а не фильтрации. При этом, для разработки алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, целесообразно использовать способ локально-скользящего сглаживания.

1.4 Выводы

В первой главе проведен анализ состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов, назначения входящих в него систем и выполняемых задач. На основании проведенного анализа определены возможные направления по решению задач с целью повышения точности и достоверности определения вторичных координат пространственного положения испытываемых объектов.

Проанализированы существующие категории траекторий и способы их описания. На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что для рассматриваемых в диссертационной работе стохастических траекторий целесообразным является применение полиномиального способа описания траектории движения ЛА.

Проанализированы существующие методы и алгоритмы обработки данных траекторных измерений. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что автоматизированные процессы послеполетной обработки данных траекторных измерений в траекторных измерительно-вычислительных комплексах, построенные на существующих методах и алгоритмах обработки данных траекторных измерений не в полной мере позволяют использовать полученную информацию для определения вторичных координат испытываемых объектов, что в целом может привести к снижению точности и достоверности полученных результатов.

На основании проведенного в первой главе анализа была сформулирована цель диссертационного исследования: повышение точности и достоверности определения вторичных координат пространственного положения ЛА в траекторных измерительно-вычислительных комплексах за счет применения разработанных методов и алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений. А также, сформулированы задачи, направленные на достижение поставленной цели.

2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Построение и исследование структур базисных функций

Для решения первой задачи диссертационного исследования в настоящем разделе будет проведено построение и исследование структур линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций. Отличительной чертой построенных и исследованных структур является то, что они позволяют проводить совместную обработку различных типов измеряемых первичных координат местоположения испытываемых объектов, получаемых от внешнетраекторных измерительных средств, для получения независимых оценок вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

2.1.1 Построение и исследование структур линейно независимых базисных функций

В первой главе был проведен анализ категорий траекторий движения объектов и способов их описания, в результате которого сделан вывод, что для описания стохастических траекторий движения ЛА более удобен полиномиальный способ.

Для полиномиального описания стохастических траекторий введем систему базисных функций и вектор коэффициентов сглаживающего полинома, состав и величина которого подлежат определению в ходе проводимого анализа [19, 41, 44, 57, 58, 59].

Исследуем две клеточно-матричные структуры базисных функций для осуществления сглаживания путем совместной обработки данных ВТИ, обладающих пространственной и временной избыточностью.

Первая структура имеет вид:

$$\varphi(t) = \begin{vmatrix} \varphi_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_z(t) \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где $\varphi_l(t) = \|(t - t_0)^0 \dots (t - t_0)^k \dots (t - t_0)^m\|$; $l = x, y, z$; m – степень сглаживающего полинома; t – текущий момент времени; t_0 – момент времени, соответствующий середине интервала сглаживания.

С учетом (5) полиномиальное описание вектор-функции $r(t)$, определяющей положение ЛА и ее координатных составляющих, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} r(t) = \varphi(t)A &= \begin{vmatrix} \varphi_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_z(t) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varphi_x(t)A_x \\ \varphi_y(t)A_y \\ \varphi_z(t)A_z \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} \sum_{k=0}^{m_x} a_{kx} \varphi_{kx}(t) \\ \sum_{k=0}^{m_y} a_{ky} \varphi_{ky}(t) \\ \sum_{k=0}^{m_z} a_{kz} \varphi_{kz}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x(t, A_x) \\ y(t, A_y) \\ z(t, A_z) \end{vmatrix}, \quad (6) \end{aligned}$$

где $A^T = \|a_{0x} \dots a_{m_x} a_{0y} \dots a_{m_y} a_{0z} \dots a_{m_z}\|$; a_{ml} – коэффициенты сглаживающего полинома соответствующей координатной составляющей вторичных параметров; $l = x, y, z$.

Вторая структура:

$$\phi(t, \tau) = \begin{vmatrix} \varphi_{00}(t, \tau_x) \varphi_{01}(t, \tau_x) \varphi_{02}(t, \tau_x) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_x) \varphi_{m1}(t, \tau_x) \varphi_{m2}(t, \tau_x) \\ \varphi_{00}(t, \tau_y) \varphi_{01}(t, \tau_y) \varphi_{02}(t, \tau_y) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_y) \varphi_{m1}(t, \tau_y) \varphi_{m2}(t, \tau_y) \\ \varphi_{00}(t, \tau_z) \varphi_{01}(t, \tau_z) \varphi_{02}(t, \tau_z) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_z) \varphi_{m1}(t, \tau_z) \varphi_{m2}(t, \tau_z) \end{vmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{где } \varphi(t, \tau) = (t-t_0)^0 \tau_l^0 (t-t_0)^0 \tau_l^1 (t-t_0)^0 \tau_l^2 \dots (t-t_0)^m \tau_l^0 (t-t_0)^m \tau_l^1 (t-t_0)^m \tau_l^2;$$

τ – вторая независимая переменная базисной функции.

С учетом (7) полиномиальное описание вектор-функции $r(t)$, определяющей положение ЛА и ее координатных составляющих, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} r(t, \tau, A) &= \varphi(t, \tau)A = \\ &= \begin{vmatrix} \varphi_{00}(t, \tau_x) \varphi_{01}(t, \tau_x) \varphi_{02}(t, \tau_x) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_x) \varphi_{m1}(t, \tau_x) \varphi_{m2}(t, \tau_x) \\ \varphi_{00}(t, \tau_y) \varphi_{01}(t, \tau_y) \varphi_{02}(t, \tau_y) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_y) \varphi_{m1}(t, \tau_y) \varphi_{m2}(t, \tau_y) \\ \varphi_{00}(t, \tau_z) \varphi_{01}(t, \tau_z) \varphi_{02}(t, \tau_z) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_z) \varphi_{m1}(t, \tau_z) \varphi_{m2}(t, \tau_z) \end{vmatrix} \cdot \|A\| = \\ &= \begin{vmatrix} \sum_{k=0}^{m_x} \sum_{l=0}^2 a_{kl} \varphi_{kl}(t, \tau_x) \\ \sum_{k=0}^{m_y} \sum_{l=0}^2 a_{kl} \varphi_{kl}(t, \tau_y) \\ \sum_{k=0}^{m_z} \sum_{l=0}^2 a_{kl} \varphi_{kl}(t, \tau_z) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varphi(t, \tau_x)A \\ \varphi(t, \tau_y)A \\ \varphi(t, \tau_z)A \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{где } A^T = \|a_{00} a_{01} a_{02} \dots a_{k0} a_{k1} a_{k2} \dots a_{m0} a_{m1} a_{m2}\|; \quad a_{kl} \quad - \quad \text{коэффициенты}$$

сглаживающего полинома; $l = 0, 1, 2$; m – степень сглаживающего полинома.

Следует обратить внимание на особенности описанных в (6) и (8) способов полиномиального представления стохастических траекторий:

- при любом способе вектор-функция $r(t)$ нелинейно зависит от времени и линейно от коэффициентов сглаживающего полинома;

- в представлении (6) формирование $x(t, A_x)$, $y(t, A_y)$, $z(t, A_z)$ происходит с участием различных составляющих вектора A , объединенных соответственно в A_x , A_y , A_z ;

- в представлении (8) каждая координатная составляющая $x(t, \tau_x, A)$, $y(t, \tau_y, A)$, $z(t, \tau_z, A)$ формируется с участием всех компонентов вектора A [19, 41, 44, 57, 58, 59].

Исследуем структуры (5) и (7) в развернутом виде.

Структура (5) в развернутом виде представлена следующим образом [19, 41, 44, 57, 58, 59]:

$$\varphi(t) = \begin{pmatrix} t_1^0 & \dots & t_1^k & \dots & t_1^m & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ t_i^0 & \dots & t_i^k & \dots & t_i^m & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ t_n^0 & \dots & t_n^k & \dots & t_n^m & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & t_1^0 & \dots & t_1^k & \dots & t_1^m & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & t_i^0 & \dots & t_i^k & \dots & t_i^m & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & t_n^0 & \dots & t_n^k & \dots & t_n^m & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & t_1^0 & \dots & t_1^k & \dots & t_1^m \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & t_i^0 & \dots & t_i^k & \dots & t_i^m \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & t_n^0 & \dots & t_n^k & \dots & t_n^m \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$ – моменты времени на интервале сглаживания; n – число точек (моментов времени) на интервале сглаживания; m – степень полинома от 0 до m_{\max} (максимально возможной).

Структура (7) в развернутом виде может быть представлена следующим образом:

$$\varphi(t, \tau) = \begin{pmatrix} \tau_x^0 t_1^0 & \tau_x^1 t_1^0 & \tau_x^2 t_1^0 & \dots & \tau_x^0 t_1^k & \tau_x^1 t_1^k & \tau_x^2 t_1^k & \dots & \tau_x^0 t_1^m & \tau_x^1 t_1^m & \tau_x^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_x^0 t_i^0 & \tau_x^1 t_i^0 & \tau_x^2 t_i^0 & \dots & \tau_x^0 t_i^k & \tau_x^1 t_i^k & \tau_x^2 t_i^k & \dots & \tau_x^0 t_i^m & \tau_x^1 t_i^m & \tau_x^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_x^0 t_n^0 & \tau_x^1 t_n^0 & \tau_x^2 t_n^0 & \dots & \tau_x^0 t_n^k & \tau_x^1 t_n^k & \tau_x^2 t_n^k & \dots & \tau_x^0 t_n^m & \tau_x^1 t_n^m & \tau_x^2 t_n^m \\ \tau_y^0 t_1^0 & \tau_y^1 t_1^0 & \tau_y^2 t_1^0 & \dots & \tau_y^0 t_1^k & \tau_y^1 t_1^k & \tau_y^2 t_1^k & \dots & \tau_y^0 t_1^m & \tau_y^1 t_1^m & \tau_y^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_y^0 t_i^0 & \tau_y^1 t_i^0 & \tau_y^2 t_i^0 & \dots & \tau_y^0 t_i^k & \tau_y^1 t_i^k & \tau_y^2 t_i^k & \dots & \tau_y^0 t_i^m & \tau_y^1 t_i^m & \tau_y^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_y^0 t_n^0 & \tau_y^1 t_n^0 & \tau_y^2 t_n^0 & \dots & \tau_y^0 t_n^k & \tau_y^1 t_n^k & \tau_y^2 t_n^k & \dots & \tau_y^0 t_n^m & \tau_y^1 t_n^m & \tau_y^2 t_n^m \\ \tau_z^0 t_1^0 & \tau_z^1 t_1^0 & \tau_z^2 t_1^0 & \dots & \tau_z^0 t_1^k & \tau_z^1 t_1^k & \tau_z^2 t_1^k & \dots & \tau_z^0 t_1^m & \tau_z^1 t_1^m & \tau_z^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_z^0 t_i^0 & \tau_z^1 t_i^0 & \tau_z^2 t_i^0 & \dots & \tau_z^0 t_i^k & \tau_z^1 t_i^k & \tau_z^2 t_i^k & \dots & \tau_z^0 t_i^m & \tau_z^1 t_i^m & \tau_z^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_z^0 t_n^0 & \tau_z^1 t_n^0 & \tau_z^2 t_n^0 & \dots & \tau_z^0 t_n^k & \tau_z^1 t_n^k & \tau_z^2 t_n^k & \dots & \tau_z^0 t_n^m & \tau_z^1 t_n^m & \tau_z^2 t_n^m \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$ – моменты времени на интервале сглаживания; n – число точек на интервале сглаживания; τ_x, τ_y, τ_z – независимые переменные, $\chi=0, 1, 2$ – индекс независимой переменной τ ; $k=0, \dots, m$ (m – степень сглаживающего полинома).

Известно [2, 3, 55, 56], что для оценки вектора положения объекта в пространстве необходимо, чтобы определитель основной матрицы $\varphi^T \varphi$ системы уравнений не был равен нулю. Для этого необходимо, чтобы системы базисных функций (9) и (10) являлись линейно независимыми.

Из теории матриц [47, 60-66] известно, что система векторов является линейно зависимой, если один из векторов линейно выражается через остальные векторы системы.

Из матриц, представленных в (9) и (10) видно, что они состоят из $3(m_{\max} + 1)$ столбцов и $3 \cdot n$ строк, где m_{\max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома, а n – количество точек на интервале сглаживания.

По структуре матрицы (9) можно сделать вывод, что система базисных функций будет линейно независимой при всех возможных значениях t_i , поскольку и столбцы, и строки этой матрицы линейно друг через друга не выражаются [19, 41, 44, 57, 58, 59].

По структуре матрицы (10) можно сделать вывод, что для выполнения условий линейной независимости системы базисных функций, должно выполняться следующее условие $\tau_x \neq \tau_y \neq \tau_z$.

Проведем анализ с целью проверки данного вывода. Для этого определим область задания аргумента τ и интервал его дискретизации $\Delta\tau_x, \Delta\tau_y, \Delta\tau_z$. С этой целью введем следующие выражения $\tau_x = \tau_0 + \Delta\tau_x$, $\tau_y = \tau_0 + \Delta\tau_y$, $\tau_z = \tau_0 + \Delta\tau_z$.

Убедимся, что при невыполнении условия $\tau_x \neq \tau_y \neq \tau_z$ система базисных функций будет линейно зависима [19, 41, 44, 57, 58, 59].

Для этого проанализируем следующие условия при построении структуры базисных функций (11-14).

$$\varphi(t, \tau) = \begin{pmatrix} \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \\ \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Для выражения (11) при условии $\Delta\tau_x = \Delta\tau_y = \Delta\tau_z$, значения $\tau_x, \tau_y, \tau_z, \tau_0$ также будут равны между собой. Соответственно в пределах имеющихся троек векторов вектор-столбцы будут отличаться между собой только аргументом τ ($\tau_0^0, \tau_0^1, \tau_0^2$ - соответственно) и как следствие будут пропорциональными относительно друг друга. При этом соответствующие строки блоков τ_x, τ_y, τ_z даже будут равны.

$$\varphi(t, \tau) = \begin{pmatrix} \tau_x^0 t_1^0 & \tau_x^1 t_1^0 & \tau_x^2 t_1^0 & \dots & \tau_x^0 t_1^k & \tau_x^1 t_1^k & \tau_x^2 t_1^k & \dots & \tau_x^0 t_1^m & \tau_x^1 t_1^m & \tau_x^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_x^0 t_i^0 & \tau_x^1 t_i^0 & \tau_x^2 t_i^0 & \dots & \tau_x^0 t_i^k & \tau_x^1 t_i^k & \tau_x^2 t_i^k & \dots & \tau_x^0 t_i^m & \tau_x^1 t_i^m & \tau_x^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_x^0 t_n^0 & \tau_x^1 t_n^0 & \tau_x^2 t_n^0 & \dots & \tau_x^0 t_n^k & \tau_x^1 t_n^k & \tau_x^2 t_n^k & \dots & \tau_x^0 t_n^m & \tau_x^1 t_n^m & \tau_x^2 t_n^m \\ \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \\ \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Для выражения (12) при условии $\Delta\tau_x \neq \Delta\tau_y = \Delta\tau_z$, значения τ_z, τ_y, τ_0 будут равны между собой, а значение τ_x будет отличаться. Соответственно в пределах имеющихся троек векторов вектор-столбцы будут отличаться между собой, но при

этом соответствующие строки блоков, имеющие аргументы $\tau_0 = \tau_z = \tau_y$, будут иметь линейную зависимость.

$$\varphi(t, \tau) = \begin{pmatrix} \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \\ \tau_y^0 t_1^0 & \tau_y^1 t_1^0 & \tau_y^2 t_1^0 & \dots & \tau_y^0 t_1^k & \tau_y^1 t_1^k & \tau_y^2 t_1^k & \dots & \tau_y^0 t_1^m & \tau_y^1 t_1^m & \tau_y^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_y^0 t_i^0 & \tau_y^1 t_i^0 & \tau_y^2 t_i^0 & \dots & \tau_y^0 t_i^k & \tau_y^1 t_i^k & \tau_y^2 t_i^k & \dots & \tau_y^0 t_i^m & \tau_y^1 t_i^m & \tau_y^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_y^0 t_n^0 & \tau_y^1 t_n^0 & \tau_y^2 t_n^0 & \dots & \tau_y^0 t_n^k & \tau_y^1 t_n^k & \tau_y^2 t_n^k & \dots & \tau_y^0 t_n^m & \tau_y^1 t_n^m & \tau_y^2 t_n^m \\ \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Для выражения (13) при условии $\Delta\tau_y \neq \Delta\tau_x = \Delta\tau_z$, значения τ_x, τ_z, τ_0 будут равны между собой, а значение τ_y будет отличаться. Соответственно в пределах имеющихся троек векторов вектор-столбцы будут отличаться между собой, но при этом соответствующие строки блоков, имеющие аргументы $\tau_0 = \tau_x = \tau_z$, будут иметь линейную зависимость.

$$\varphi(t, \tau) = \begin{pmatrix} \tau_0^0 t_1^0 & \tau_0^1 t_1^0 & \tau_0^2 t_1^0 & \dots & \tau_0^0 t_1^k & \tau_0^1 t_1^k & \tau_0^2 t_1^k & \dots & \tau_0^0 t_1^m & \tau_0^1 t_1^m & \tau_0^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_i^0 & \tau_0^1 t_i^0 & \tau_0^2 t_i^0 & \dots & \tau_0^0 t_i^k & \tau_0^1 t_i^k & \tau_0^2 t_i^k & \dots & \tau_0^0 t_i^m & \tau_0^1 t_i^m & \tau_0^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_0^0 t_n^0 & \tau_0^1 t_n^0 & \tau_0^2 t_n^0 & \dots & \tau_0^0 t_n^k & \tau_0^1 t_n^k & \tau_0^2 t_n^k & \dots & \tau_0^0 t_n^m & \tau_0^1 t_n^m & \tau_0^2 t_n^m \\ \tau_z^0 t_1^0 & \tau_z^1 t_1^0 & \tau_z^2 t_1^0 & \dots & \tau_z^0 t_1^k & \tau_z^1 t_1^k & \tau_z^2 t_1^k & \dots & \tau_z^0 t_1^m & \tau_z^1 t_1^m & \tau_z^2 t_1^m \\ \dots & \dots \\ \tau_z^0 t_i^0 & \tau_z^1 t_i^0 & \tau_z^2 t_i^0 & \dots & \tau_z^0 t_i^k & \tau_z^1 t_i^k & \tau_z^2 t_i^k & \dots & \tau_z^0 t_i^m & \tau_z^1 t_i^m & \tau_z^2 t_i^m \\ \dots & \dots \\ \tau_z^0 t_n^0 & \tau_z^1 t_n^0 & \tau_z^2 t_n^0 & \dots & \tau_z^0 t_n^k & \tau_z^1 t_n^k & \tau_z^2 t_n^k & \dots & \tau_z^0 t_n^m & \tau_z^1 t_n^m & \tau_z^2 t_n^m \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Для выражения (14) при условии $\Delta\tau_x = \Delta\tau_y \neq \Delta\tau_z$, значения τ_x, τ_y, τ_0 будут равны между собой. Соответственно в пределах имеющихся троек векторов вектор-столбцы будут отличаться между собой, но при этом соответствующие строки блоков, имеющие аргументы $\tau_0 = \tau_x = \tau_y$, будут иметь линейную зависимость.

Проведенное исследование структур базисных функций показывает, что построенные структуры базисных функций будут линейно независимы при следующих условиях:

- для структуры (9) - при всех возможных значениях t_i , поскольку и столбцы, и строки этой матрицы линейно друг через друга не выражаются;
- для структуры (10) – при выполнении следующего условия: $\tau_x \neq \tau_y \neq \tau_z$ [19, 41, 44, 57, 58, 59].

2.1.2 Построение и исследование структур Λ -ортогональных базисных функций

На основе построенных и исследованных в предыдущем параграфе структур ЛНБФ (9) и (10), исследуем структуры Λ -ортогональных базисных функций (Λ -ОБФ) [19, 41, 44, 57, 58, 59].

При первом способе, построения Λ -ОБФ основная матрица системы приводится к диагональной форме за счет вычисления собственных значений и собственных векторов этой матрицы [60-74].

При втором способе построения Λ -ОБФ используем структуру ЛНБФ (10). Рассмотрим данный способ построения Λ -ОБФ более детально [19, 40, 43, 58].

Как было отмечено, исходная система ЛНБФ имеет вид (10) с общим элементом $\varphi_{kl}(t, \tau)$, где $k=0, \dots, m$; $l=0, 1, 2$; $t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$ – моменты времени на интервале сглаживания, n – число точек (моментов времени) на интервале сглаживания, τ – независимая переменная, принимающая значения τ_x, τ_y, τ_z [19, 41, 44, 57, 58, 59].

Построим систему Λ -ОБФ вида:

$$P_{00}(t, \tau) \ P_{01}(t, \tau) \ P_{02}(t, \tau) \dots P_{kl}(t, \tau) \dots P_{m0}(t, \tau) \ P_{m1}(t, \tau) \ P_{m2}(t, \tau) \quad (15)$$

с общим элементом $P_{kl}(t, \tau)$, для которой недиагональные элементы основной матрицы системы уравнений равны нулю, т.е.

$$J_{kl}^T \Lambda J_{kl} = 0, \quad (16)$$

где J – матрица Якоби, элементы которой $J_{kl} = F P_{kl}$; F – элемент матрицы проекций градиентов.

Для начала процесса Λ -ортогонализации положим [19, 41, 44, 57, 58, 59]:

$$P_{00}(t, \tau) \equiv \varphi_{00}(t, \tau); \ J_{00} \equiv \Phi_{00}.$$

Тогда:

$$P_{01}(t, \tau) = \alpha_{00,01} P_{00}(t, \tau) + \varphi_{01}(t, \tau). \quad (17)$$

Учитывая условие (16) определим вспомогательный коэффициент $\alpha_{00,01}$.

С этой целью вычислим вектор-столбец J_{01} на базе известных J_{00} и Φ_{01} благодаря выражению:

$$J_{01} = \alpha_{00,01} J_{00} + \Phi_{01}. \quad (18)$$

Осуществим транспонирование вектора J_{01} , а затем умножим его на ΛJ_{00} , на основании (16), приравняем к нулю полученный результат:

$$J_{01}^T \Lambda J_{00} = \alpha_{00,01} J_{00}^T \Lambda J_{00} + \Phi_{01}^T \Lambda J_{00} = 0. \quad (19)$$

Благодаря полученному выражению (19) вычислим значение вспомогательного коэффициента $\alpha_{00,01}$:

$$\alpha_{00,01} = -\frac{\Phi_{01}^T \Lambda J_{00}}{J_{00}^T \Lambda J_{00}}. \quad (20)$$

Далее, благодаря выражению:

$$P_{02}(t, \tau) = \alpha_{00,02} P_{00}(t, \tau) + \alpha_{01,02} P_{01}(t, \tau) + \varphi_{02}(t, \tau) \quad (21)$$

определяем вспомогательные коэффициенты $\alpha_{00,02}$ и $\alpha_{01,02}$.

Для этого на базе известных J_{00} , J_{01} и Φ_{02} вычислим вектор-столбец:

$$J_{02} = \alpha_{00,02} J_{00} + \alpha_{01,02} J_{01} + \Phi_{02}. \quad (22)$$

Проведем транспонирование вектора J_{02} , умножим на ΛJ_{00} , полученный результат на основании (16) приравниваем к нулю.

Таким образом получим:

$$J_{02}^T \Lambda J_{00} = \alpha_{00,02} J_{00}^T \Lambda J_{00} + \alpha_{01,02} J_{01}^T \Lambda J_{00} + \Phi_{02}^T \Lambda J_{00} = 0. \quad (23)$$

За счет умножения J_{02}^T на ΛJ_{01} получим:

$$J_{02}^T \Lambda J_{01} = \alpha_{00,02} J_{00}^T \Lambda J_{01} + \alpha_{01,02} J_{01}^T \Lambda J_{01} + \Phi_{02}^T \Lambda J_{01} = 0. \quad (24)$$

Используя выражение (16), упрощаем выражения (23) и (24):

$$\alpha_{00,02} J_{00}^T \Lambda J_{00} + \Phi_{02}^T \Lambda J_{00} = 0,$$

$$\alpha_{01,02} J_{01}^T \Lambda J_{01} + \Phi_{02}^T \Lambda J_{01} = 0. \quad (25)$$

На основании выражений (25) вычисляем значения вспомогательных коэффициентов:

$$\alpha_{00,02} = -\frac{\Phi_{02}^T \Lambda J_{00}}{J_{00}^T \Lambda J_{00}},$$

$$\alpha_{01,02} = -\frac{\Phi_{02}^T \Lambda J_{01}}{J_{01}^T \Lambda J_{01}}. \quad (26)$$

В дальнейшем процесс повторяется до получения $P_{m2}(t, \tau)$.

Если найдена функция $P_{k(l-1)}(t, \tau)$ системы (15), то следующая функция $P_{kl}(t, \tau)$ будет найдена из рекуррентного соотношения:

$$P_{kl}(t, \tau) = \sum_{\chi=0}^{k-1} \sum_{\lambda=0}^2 \alpha_{\chi\lambda,kl} P_{\chi\lambda}(t, \tau) + \sum_{\chi=0}^k \sum_{\lambda=0}^{l-1} \alpha_{\chi\lambda,kl} P_{\chi\lambda}(t, \tau) + \varphi_{kl}(t, \tau), \quad (27)$$

где

$$\alpha_{\chi\lambda,kl} = -\frac{\Phi_{kl}^T \Lambda J_{\chi\lambda}}{J_{\chi\lambda}^T \Lambda J_{00\chi\lambda}}. \quad (28)$$

На основе работ [19, 41, 44, 57, 58, 59] можно показать, что между системами функций $P(t, \tau)$ и $\varphi(t, \tau)$ существует линейная связь:

$$P(t, \tau) = \varphi(t, \tau)U, \quad (29)$$

где

$$U = \left\| \begin{array}{cccccc} 1 & U_{00,01} & U_{00,02} & \cdots & U_{00,kl} & \cdots & U_{00,m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & U_{\chi\lambda,kl} & \cdots & U_{\chi\lambda,m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{array} \right\|$$

верхняя треугольная матрица, диагональные элементы которой равны единице, а элементы, расположенные выше главной диагонали, вычисляются благодаря следующему выражению с использованием коэффициентов $\alpha_{pq,kl}$:

$$U_{\chi\lambda,kl} = \sum_{p=0}^k \sum_{q=0}^{l-1} U_{\chi\lambda,pq} \alpha_{pq,kl} + \sum_{p=0}^{k-1} \sum_{q=0}^2 U_{\chi\lambda,pq} \alpha_{pq,kl}. \quad (30)$$

На основе работ [19, 41, 44, 57, 58, 59] можно показать, что (28) и (30) взаимосвязаны исходя из следующего выражения:

$$U = \begin{vmatrix} 1 & U_{00,01} & U_{00,02} & \dots & U_{00,kl} & \dots & U_{00,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & U_{\chi\lambda,kl} & \dots & U_{\chi\lambda,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & -\alpha_{00,01} & -\alpha_{00,02} & \dots & -\alpha_{00,kl} & \dots & -\alpha_{00,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & -\alpha_{\chi\lambda,kl} & \dots & -\alpha_{\chi\lambda,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix}^{-1}. \quad (31)$$

При приведении основной матрицы системы уравнений к диагональному виду получаем независимые оценки коэффициентов вектора коэффициентов сглаживающего полинома, так как в этом случае система уравнений представляет собой совокупность уравнений для независимого вычисления приращений вектора коэффициентов сглаживающего полинома. При этом недиагональные элементы построенной Λ -ОБФ должны быть равны нулю [19, 41, 44, 57, 58, 59].

Оценку точности способов построения Λ -ОБФ проведем по величине недиагональных элементов корреляционной матрицы ошибок оценок коэффициентов сглаживающего полинома, так как данная матрица является матрицей обратной основной матрицы системы Λ -ОБФ [19, 41, 44, 57, 58, 59].

Для структуры Λ -ОБФ построенной с применением структуры ЛНБФ (9) корреляционная матрица ошибок оценок коэффициентов сглаживающего полинома имеет вид [19, 41, 44, 57, 58, 59, 75-78]:

$$K_{\hat{A}} = \Gamma^{-1} G^T G \Gamma G^T G \Gamma^{-1} = \Gamma^{-1}, \quad (32)$$

где Γ – диагональная матрица собственных значений основной матрицы системы $\Phi^T \Lambda \Phi$, построенной с использованием структуры ЛНБФ (9); G – матрица собственных векторов основной матрицы системы уравнений $\Phi^T \Lambda \Phi$.

Из (32) следует, что корреляционная матрица $K_{\hat{A}}$ ошибок оценок коэффициентов сглаживающего полинома является матрицей, обратной матрице собственных значений, и поэтому является диагональной, как и матрица собственных значений.

Для структуры Λ -ОБФ построенной на основе структуры ЛНБФ (10) корреляционная матрица ошибок оценок коэффициентов сглаживающего полинома имеет вид:

$$K_{\hat{A}} = (J^T \Lambda J)^{-1}. \quad (33)$$

Из (33) следует, что $K_{\hat{A}}$ является матрицей системы уравнений $J^T \Lambda J$, а так как Λ -ОБФ строится из предположения, что недиагональные элементы равны нулю, то основная матрица $J^T \Lambda J$ является диагональной, следовательно, и $K_{\hat{A}}$ также будет диагональной матрицей [19, 41, 44, 57, 58, 59].

В результате проведенной работы, на основе структур ЛНБФ (9) и (10), были построены и исследованы два способа построения структур Λ -ортогональных базисных функций. Было установлено, что между структурами ЛНБФ и Λ -ОБФ существует линейная связь (29). Показано, что приведение основной матрицы системы Λ -ОБФ к диагональному виду позволит в дальнейшем получить независимые оценки коэффициентов вектора коэффициентов сглаживающего полинома. Для разработки алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений целесообразно использовать структуру ЛНБФ (10), так как для структуры ЛНБФ (9) существует необходимость нахождения трех составляющих вектора коэффициентов сглаживающего полинома

(для каждой вторичной координаты положения ЛА отдельно), а для структуры ЛНБФ (10) в этом нет необходимости, так как в данном случае, вектор коэффициентов сглаживающего полинома состоит из троек элементов вторичных координат ЛА, что в свою очередь упрощает процесс обработки данных

2.2 Определение начального приближения на первом шаге ЛЛС и максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома

В данном параграфе предложен и обоснован способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания, отличающийся от ранее разработанных тем, что на последующем шаге локально-скользящего сглаживания данных измерений отпадает необходимость нахождения начального приближения вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома, а используется значение, которое было получено на предыдущем шаге локально-скользящего сглаживания [1, 3, 19, 79, 80].

2.2.1 Построение итеративного алгоритма для определения статистической оценки вектора коэффициентов сглаживающего полинома

В предыдущих параграфах диссертационного исследования с целью полиномиального описания стохастических траекторий были построены и исследованы структуры базисных функций (6) и (8). При этом, особенностью данных способов является то, что при любом способе вектор-функция $r(t)$

нелинейно зависит от времени и линейно от коэффициентов сглаживающего полинома при этом в структуре (6) формирование $x(t, A_x)$, $y(t, A_y)$, $z(t, A_z)$ происходит с участием различных составляющих вектора A , объединенных соответственно в A_x , A_y , A_z , а в структуре (8) каждая координатная составляющая $x(t, \tau_x, A)$, $y(t, \tau_y, A)$, $z(t, \tau_z, A)$ формируется с участием всех компонентов вектора A .

Особенностью стохастического характера траектории ЛА является то, что решение задачи по определению максимально достоверного значения (МДЗ) вектора A – коэффициентов сглаживающего полинома, должно быть взаимосвязано с решением задачи по определению их состава. Данная особенность решения поставленной задачи приводит к необходимости получения статистически независимых оценок коэффициентов сглаживающего полинома.

Ввиду того, что стохастический характер траекторий трудно совместим с их высокой априорной определенностью, прикладные методы обработки данных траекторных измерений целесообразно строить на основе статистических методов, не связанных с использованием априорной информации о распределении составляющих вектора A – коэффициентов сглаживающего полинома. В связи с тем, что векторы ξ -измерений и коэффициентов сглаживающего полинома являются многомерными случайными величинами, взаимное соответствие между ними определяется совместной плотностью вероятности [1].

Из-за нелинейной зависимости вектора измерений от вектора коэффициентов сглаживающего полинома решение задачи по определению МДЗ вектора \hat{A} целесообразно искать методом последовательных приближений. Для совместной реализации пространственной и временной избыточности данных измерений с целью определения статистической оценки (СО) вектора \hat{A} – коэффициентов сглаживающего полинома в работах [1, 3, 19, 79, 80] получен универсальный итеративный алгоритм:

$$\hat{A}_{v+1} = \hat{A}_v + \Delta \hat{A}_v = \hat{A}_v + (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda \{\xi - \xi[r(t, A_v)]\}, \quad (34)$$

где J – матрица Якоби частных производных от измеряемых по вычисляемым параметрам; ν – номер ν -го приближения; $J_\nu^T \Lambda J_\nu$ – основная матрица системы уравнений на ν -ом шаге приближения; Λ – весовая матрица ошибок измерений.

Из (34) следует, что СО достигается через ряд последовательных приближений, в которых основным моментом является решение линеаризованной системы уравнений с целью определения вектора поправки $\Delta \hat{A}_\nu$.

Указанный алгоритм инвариантен относительно закона распределения ошибок траекторных измерений, что очень важно для его практической реализации. К законам распределения ошибок измерений остаются чувствительными лишь свойства полученной с помощью этого алгоритма СО [3, 44, 45, 50]:

- при нормальном законе – это максимально правдоподобная оценка;
- при других законах – это оценка с минимальной дисперсией.

При этом, из соотношения (34) видно, что для начала итеративного процесса необходимо иметь начальное приближение вектора коэффициентов сглаживающего полинома. Данный процесс будет исследован в следующем параграфе [1, 3, 19, 79, 80].

2.2.2 Определение начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания

Как уже было отмечено в предыдущем параграфе, для начала процесса решение задачи по определению МДЗ вектора \hat{A} с использованием разработанного универсального итеративного алгоритма необходимо определить начальное приближение вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания [1, 3, 19, 79, 80].

Начальное приближение вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге сглаживания может быть получено следующим способом.

Выполним совместное линейное сглаживания прямоугольных координат, полученных одним из простых методов. С этой целью исследуем следующую систему уравнений [3]:

$$\varphi^T \varphi C = \varphi^T r^*, \quad (35)$$

где $\varphi^T \varphi$ – основная матрица системы уравнений; C – вектор-столбец коэффициентов полинома; φ – матрица, составленная из базисных функций; r^* – вектор-столбец вторичных координат, рассчитанный одним из простых методов по минимально необходимому набору первичных измерений ξ^* .

Для определения значения вектора оценок коэффициентов полинома умножим (35) слева на матрицу, обратную основной матрице. В результате получим следующее выражение:

$$\hat{C} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T r^*, \quad (36)$$

где \hat{C} – вектор-столбец, состоящий из оценок коэффициентов полинома.

Как видно из работ [47, 60-65], система линейных уравнений (35) имеет единственное решение, если определитель основной матрицы системы уравнений не равен нулю, то есть $\det(\varphi^T \varphi) \neq 0$.

При использовании базисных функций (5) и (7) основная матрица системы уравнений (35) является симметричной [3, 60, 63, 64]. Определитель такой матрицы является определителем Грама. Из линейной алгебры [47, 62, 65] известно, что определитель Грама больше нуля, если система базисных функций является линейно независимой.

Умножив (36) слева на матрицу φ , получим начальное приближение вектора вторичных координат в виде:

$$\hat{r}_0 = \varphi \hat{C} = \varphi (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T r^*. \quad (37)$$

Пересчитав сглаженные значения начального приближения вторичных координат по известным формулам [1, 3] в первичные координаты, получим начальное приближение первичных координат $\hat{\xi}_0$:

$$\xi^* \rightarrow r^* \rightarrow \varphi \rightarrow \varphi^T \varphi \rightarrow (\varphi^T \varphi)^{-1} \rightarrow (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T \rightarrow \hat{C}_0 \rightarrow \hat{r}_0 \rightarrow \hat{\xi}_0$$

В результате исследования предложен способ решения задачи по определению начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома (\hat{C}_0), а также порядок вычисления начальных приближений первичных ($\hat{\xi}_0$) и вторичных координат (\hat{r}_0) ЛА [1, 3, 19, 79, 80].

Следующим этапом исследования является поиск максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

2.2.3 Определение максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома

На основании ранее построенных и исследованных структур Λ -ОБФ, разработанного итеративного алгоритма и решения задачи по определению начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома перейдем к решению задачи по поиску максимально достоверного значения (МДЗ) вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

Процедура поиска максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома может быть реализована методом последовательных приближений [19, 79, 80].

В общем виде, после нахождения начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома последовательность решения данной задачи можно представить следующим образом:

$$\overbrace{\hat{C}_v \rightarrow \hat{r}_v \rightarrow \hat{\xi}_v \rightarrow \Phi_v \rightarrow \Delta \hat{C}_v \rightarrow \hat{C}_{v+1} \rightarrow \hat{r}_{v+1} \rightarrow |\Delta \hat{r}_v| > \varepsilon}^{\text{Дв}} \quad (38)$$

где номер приближения $v = 1, 2, \dots$ и до тех пор, пока $\Delta \hat{r}_v$ в любой точке интервала сглаживания не станет меньше заданного значения $\varepsilon = 0,1, \dots, 0,5$ м; $\Phi = F\varphi$ – матрица Якоби; F – матрица проекций градиентов.

Из работ [3, 28, 70] известно, что при использовании системы линейно независимых базисных функций (ЛНБФ) оценки коэффициентов сглаживающего полинома оказываются взаимно коррелированными. Это обстоятельство затрудняет оценку точности определения сглаженных параметров и построение адаптивных алгоритмов. Кроме того, применение при сглаживании ЛНБФ имеет ряд недостатков, а именно [3]:

- возникает необходимость составления и повторного решения системы уравнений при изменении порядка ЛНБФ;
- приводит к снижению точности вычислений, если система ЛНБФ такова, что заметно снижается обусловленность основной матрицы системы уравнений, вследствие чего ее определитель приближается к нулю.

Применение Λ -ОБФ позволяет избавиться от перечисленных недостатков. Установлено [1, 3, 19, 67, 79, 80,], что Λ -ОБФ обладает рядом преимуществ в сравнении с ЛНБФ, а именно:

1. С применением Λ -ОБФ решение системы уравнений распадается на ряд уравнений для независимого вычисления оценок коэффициентов сглаживающего полинома, при этом оценка каждого коэффициента выражается через данные измерений и значение только одной соответствующей ему функции.
2. Отсутствует необходимость пересоставления и повторного решения системы уравнений при изменении степени аппроксимирующего полинома.
3. Существует возможность оптимизации степени и структуры сглаживающего полинома.

Следовательно, для нахождения МДЗ вектора коэффициентов сглаживающего полинома с применением итеративного алгоритма будем использовать построенные и исследованные ранее структуры Λ -ОБФ.

При этом необходимо учитывать следующее условие, а именно, существующую взаимосвязь между системами ЛНБФ и Λ -ОБФ. Поэтому при поиске МДЗ вектора коэффициентов сглаживающего полинома необходимо учитывать, что для построения очередного приближения \hat{A}_{v+1} найденная поправка $\Delta\hat{A}_v$ должна быть сложена с \hat{A}_v , соответствующими той же системе Λ -ОБФ P_v , а не с \hat{C}_v , соответствующими системе ЛНБФ φ_v . Для этого ранее найденный вектор \hat{C}_v должен быть преобразован в вектор \hat{A}_v путем преобразования: $A_v = U_v^{-1}C_v$, где U_v^{-1} – матрица, обеспечивающая связь между C_v и A_v на v шаге приближения к МДЗ вектора коэффициентов сглаживающего полинома [1, 3, 19, 79, 80].

Данный вывод можно сделать из тождественности следующих преобразований:

$$\hat{r}(t, C) = \varphi\hat{C} = \varphi I\hat{C} = \varphi U U^{-1}\hat{C} = P\hat{A}, \quad (39)$$

где I – единичная матрица; \hat{r} – оценка вектора положения объекта в пространстве.

В этом случае, последовательность действий по определению МДЗ можно представить в следующем виде [50]:

$$\hat{C}_v \rightarrow \hat{r}_v \rightarrow \hat{\xi}_v \rightarrow \Delta\hat{\xi}_v \rightarrow \Phi_v \rightarrow P_v \rightarrow J_v \rightarrow \hat{A}_v \rightarrow \Delta\hat{A}_v \rightarrow \hat{A}_{v+1} \rightarrow \hat{r}_{v+1} \rightarrow |\Delta\hat{r}_v| > \varepsilon, \quad (40)$$

где номер приближения $v=1, 2, \dots$ и до тех пор, пока $\Delta\hat{r}_v$ в любой точке интервала сглаживания не станет меньше установленного порогового значения $\varepsilon = 0,1, \dots, 0,5$ м; $\Phi_v = F_v\varphi_v$, $J_v = F_vP_v$ – матрицы Якоби, построенные

соответственно на ЛНБФ φ и Λ -ОБФ P на v шаге приближения; F_v – матрица проекций градиентов на v шаге приближения.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что МДЗ вектора коэффициентов сглаживающего полинома может быть определена благодаря разработанному итеративному алгоритму с применением структуры Λ -ОБФ. Но, прежде чем перейти к построению алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания, необходимо убедиться в точности построения максимального достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома [1, 3, 19, 29, 59, 79, 80].

2.2.4 Исследование точности построения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома

Исходя из анализа процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома можно сделать вывод, что для решения задачи нелинейного сглаживания Λ -ортогонализацию необходимо производить на каждом шаге приближения к МДЗ [1, 3, 19, 79, 80].

С этой целью на различных этапах последовательного приближения выражение (29) будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \varphi U_1, \\
 P_2 &= P_1 U_2, \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \\
 P_v &= P_{v-1} U_v,
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

где v – номер последовательного приближения к МДЗ положения объекта в пространстве.

Из выражений (41) следует общее выражение, позволяющее описывать линейную связь между P и φ в виде:

$$P_v = \varphi U_1 U_2 \dots U_v = \varphi U_{\Pi}, \quad (42)$$

где $U_{\Pi} = U_1 U_2 \dots U_v$ – матрица, полученная в результате перемножения U матриц до v -го последовательного приближения включительно.

Для определения точности построения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, к которой приводит предложенный итеративный алгоритм (34) через ряд последовательных приближений, предположим, что очередное вычисленное значение оценки вектора коэффициентов сглаживающего полинома совпало с истинным значением вектора ($\hat{A}_v = A$), и ошибки измерений относительно невелики. В практике траекторных измерений последнее допущение всегда выполняется.

Данные допущения позволяют определить отклонение вектора коэффициентов сглаживающего полинома на последнем шаге приближения формулой

$$\Delta \hat{A}_v = \hat{A}_v - A = (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda \Delta \xi_v. \quad (43)$$

Так как систематические ошибки исключены при обработке введением поправок, то математическое ожидание ошибок будет иметь вид:

$$M(\Delta \hat{A}_v) = (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda M(\Delta \xi_v),$$

а корреляционная матрица ошибок оценок коэффициентов сглаживающего полинома

$$K_{\hat{A}} = M\{[\Delta \hat{A}_v - M(\Delta \hat{A}_v)][\Delta \hat{A}_v - M(\Delta \hat{A}_v)]^T\} = (J_v^T \Lambda J_v)^{-1}. \quad (44)$$

Следовательно, корреляционная матрица ошибок оценок коэффициентов сглаживающего полинома может быть получена обращением основной матрицы системы нормальных уравнений, вычисленной для последнего приближения этих параметров [1, 3, 19, 74, 79, 80].

Для сохранения ранее введенных обозначений J для матрицы Якоби и \hat{A} для вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома, полученных при независимом вычислении составляющих вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома с использованием Λ -ОБФ, введем соответственно новые обозначения Φ и \hat{C} для матрицы Якоби и вектора коэффициентов, получаемых при прямом решении системы уравнений с использованием системы ЛНБФ [3].

Тогда вектор-поправку в новых обозначениях

$$\Delta C_v = (\Phi_v^T \Lambda \Phi_v)^{-1} \Phi_v^T \Lambda \Delta \xi_v \quad (45)$$

можно рассматривать как результат решения матричной системы уравнений вида:

$$\Phi_v^T \Lambda \Phi_v \Delta C_v = \Phi_v^T \Lambda \Delta \xi_v, \quad (46)$$

где Φ_v – матрица Якоби; Λ – весовая матрица; $\Delta \xi_v$ – отклонение вектора измерений от v -го приближения измеряемого вектора; ΔC_v – вектор-поправка коэффициентов полинома на v -м шаге приближения; $\Phi_v^T \Lambda \Phi_v$ – основная матрица системы уравнений на v -м шаге приближения [1, 3, 19, 79, 80].

Исходя из зависимости вектора измеряемых ξ параметров от вектора вычисляемых параметров, целесообразно искать Φ как матрицу последовательного преобразования [1, 28]:

$$\Phi = F\varphi, \quad (47)$$

где F – матрица пространственного преобразования (матрица проекций градиентов); φ – матрица временного преобразования.

Таким образом, исходя из проведенного исследования определения точности построения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, можно сделать вывод, что точность построения определяется по величине недиагональных элементов основной матрицы системы уравнений, которые должны стремиться к нулю [1, 3, 19, 79, 80]..

В результате проведенного исследования был предложен и обоснован способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания, позволяющий начать итеративный процесс поиска максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома [1, 3, 19, 79, 80]. Выполнение этой задачи исследования в последующем позволит приступить к разработке алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

2.3 Разработка и исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома

На основе критериев проверки статистических гипотез с целью формирования вектора коэффициентов сглаживающего полинома проведем исследование методов позволяющих определить значимые коэффициенты сглаживающего полинома [44].

Исследуются следующие разработанные методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, применяемые в алгоритме адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений:

- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией степени сглаживавшего полинома;

- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 1 и Структура 2) [29, 30, 44].

Исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома проведем на примере полинома 5 степени.

Из работ [1, 3, 19, 30, 57] следует, что вектор коэффициентов сглаживающего полинома имеют следующий вид:

$$A^T = \|a_{00} a_{01} a_{02} \dots a_{k0} a_{k1} a_{k2} \dots a_{m0} a_{m1} a_{m2}\|, \quad (48)$$

где a_{kl} – коэффициенты сглаживающего полинома; $l=0, 1, 2$; m – степень сглаживающего полинома.

Как видно из (48), вектор коэффициентов сглаживающего полинома представляет собой тройки элементов a_{kl} . Условно вектор коэффициентов сглаживающего полинома представим следующим образом (рисунок 6).

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{40}	a_{41}	a_{42}	a_{50}	a_{51}	a_{52}
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рисунок 6 - Вектор коэффициентов сглаживающего полинома 5 степени

Далее рассмотрим более детально разработанные методы.

Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией степени сглаживавшего полинома. В исследуемом методе проверка значимости коэффициентов сглаживающего полинома начинается с тройки элементов (пятой степени) вектора коэффициентов сглаживающего полинома и заканчивается при условии, когда значение хотя бы одного элемента из тройки элементов превышает пороговое значение (рисунок 7) [29, 30, 44].

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{40}	a_{41}	a_{42}	0	0	0
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рисунок 7 - Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией степени сглаживавшего полинома

В этом случае данный элемент и все предшествующие ему тройки элементов считаются значимыми и принимаются равными по значению оценкам соответствующих элементов (тройки 0, 1, 2, 3, 4 степени). Все последующие элементы считаются не значимыми и принимаются равными нулю (тройка 5 степени).

Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 1). В исследуемом методе осуществляется проверка значимости всех коэффициентов сглаживающего полинома, начиная с последней тройки элементов (рисунок 8) [29, 30, 44].

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	0	0	a_{21}	0	a_{30}	0	0	a_{40}	0	0	0	0	a_{52}
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рисунок 8 - Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией стструктуры сглаживавшего полинома (Структура 1)

Если внутри проверяемой тройки элементов их значения превышают установленное пороговое значение, то данная тройка элементов включается в составе вектора без изменений (тройка 0 степени). В тех случаях, когда значения элементов внутри тройки ниже установленного порогового уровня, то их значения приравниваются к нулю (тройки 2, 3, 4, 5 степени). Процесс проверки продолжается до тех пор, пока в составе очередной проверяемой тройки элементов, значение двух элементов будут выше порогового значения (тройка 1 степени) [29, 30, 44].

Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 2). В исследуемом методе проводится проверка значимости всех коэффициентов сглаживающего полинома начиная с последней тройки элементов (рисунок 9) [29, 30, 44].

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{10}	a_{11}	a_{12}	0	a_{21}	0	a_{30}	0	a_{32}	0	0	0	a_{50}	0	a_{52}
Тройка 0 степени			Тройка 1 степени			Тройка 2 степени			Тройка 3 степени			Тройка 4 степени			Тройка 5 степени		

Рисунок 9 - Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживавшего полинома (Структура 2)

Если внутри проверяемой тройки элементов их значение превышает установленное пороговое значение, то тройка входит в составе вектора без изменений (тройки 0, 1 степени). Процесс проверки значимости элементов продолжается до тех пор, пока в составе очередной проверяемой тройки элементов, значения всех трёх элементов не окажутся выше установленного порогового значения (тройка 1 степени) [29, 30, 44].

Из работ [1, 3, 19, 30, 57] известно, что применение структур Λ -ОБФ в алгоритме нелинейного сглаживания приводит к независимым оценкам коэффициентов сглаживающего полинома и некоррелированности их ошибок. Это позволяет, по аналогии с линейным адаптивным сглаживанием, решать задачу оптимизации степени или структуры сглаживающего полинома и при нелинейном сглаживании путём обнаружения того или иного элемента в составе вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома. При этом следует иметь в виду, что при нелинейном сглаживании данных многопараметрических измерений в векторе коэффициентов сглаживающего полинома при той же его степени (порядке) будет в три раза больше элементов, чем при линейном сглаживании. Это следует из структуры вектора коэффициентов сглаживающего полинома, позволяющего совместно описывать сразу все три координатные составляющие вектора вторичных параметров положения ЛА.

Как уже говорилось выше и изложено в работах [1, 3, 19, 30, 57], использование структуры Λ -ОБФ позволяет существенно упростить адаптивный алгоритм, так как при подготовке и проверке новой гипотезы нет необходимости пересоставлять и повторно решать систему уравнений. Данный вывод распространяется и на нелинейное сглаживание, так как в алгоритме нелинейного сглаживания линеаризация и построение структуры Λ -ОБФ производится на каждом шаге приближения к максимально правдоподобной оценке положения ЛА в пространстве.

В связи с вышеизложенным, при обработке стохастических траекторий, возникает необходимость в применении критериев проверки статистических гипотез, не требующих полной априорной информации о характере траекторий. Такими критериями и методами проверки статистических гипотез о наличии или отсутствии того или иного коэффициента в составе вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома могут быть [12, 46, 70]: критерий минимума смещения, Фишера, Стьюдента, Пирсона, Лапласа-Гаусса, сохраняющие работоспособность при ограниченной априорной информации. Это обстоятельство имеет важное значение при стохастической траектории движения ЛА. В этом случае в качестве априорной информации выступает максимально возможная степень сглаживающего полинома, предположение о нормальном законе распределения оценок коэффициентов сглаживающего полинома и дисперсия быстро флуктуирующих ошибок измерений. Данные ограничения не являются сильными, так как из-за инерционности движения ЛА всегда можно указать такую степень (не очень большую), при которой выполняется условие $\hat{m} \leq m_{max}$, (где \hat{m} – оптимальная степень сглаживающего полинома; m_{max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома). Нормальность распределения оценок коэффициентов сглаживающего полинома обоснована ранее в работах [1, 12, 57]. Что же касается дисперсии быстро флуктуирующих ошибок измерений, то в ряде методов (минимума смещения, Фишера, Стьюдента) она и не требуется, так как вместо нее используется оценка дисперсии [31, 33, 46, 57]. Различие методов проверки статистических гипотез состоит в использовании различных статистик,

дисперсий ошибок или их оценок и применении различных критериев оптимальности, сводящихся, в основном, к минимизации вероятности ложного не обнаружения коэффициента при заданной вероятности ложного его обнаружения (заданной доверительной вероятности).

Общими для всех методов проверки статистических гипотез являются [3, 30, 57]:

- формирование по данным измерений соответствующей статистики;
- сравнение этой статистики с пороговым уровнем, зависящим от доверительной вероятности и числа степеней свободы;
- принятие решения о включении данного компонента в состав полинома.

Нелинейное сглаживание, в ходе которого автоматически определяется оптимальная степень или структура полинома, будем называть адаптивным нелинейным сглаживанием, поскольку при этом не только параметры, но и структура алгоритма сглаживания автоматически приспособливается к стохастической форме траектории. Оптимальной степенью сглаживающего полинома считается структура вектора коэффициентов сглаживавшего полинома, в которую включены все элементы вектора до последнего значения, которые больше порога и в которой все компоненты незначимо отличные от нуля, заменены нулями [1, 28].

На базе работ [28, 57] исследовались перечисленные выше критерии оптимальности. Предпочтение отдается критерию Фишера, как более экономичному при определении статистики (нет операции извлечения корня).

Метод Фишера основан на критерии Фишера. В этом методе рассматривается статистика [31, 83]:

$$F_{1,v} = \frac{\hat{a}_{\chi k}^2}{\hat{\sigma}_{\hat{a}_{\chi k}}^2}, \quad (49)$$

которая определяет отношение квадрата оценки коэффициента полинома к оценке его дисперсии (где $\chi=0, 1, 2; k = 0, \dots, m_{max}$) [30, 44, 54]:

Причем $\hat{a}_{\chi k}^2$ и $\hat{\sigma}_{\hat{a}_{\chi k}}^2$, входящие в состав (49), есть независимые случайные величины, распределенные по законам χ^2 с одной и V степенями свободы. Благодаря тому, что в алгоритме нелинейного сглаживания совместно реализуется пространственная и временная избыточность данных измерений, а оценка каждого коэффициента сглаживающего полинома находится по всему ряду измерений на интервале сглаживания, степень свободы будет определяться через весь ряд измерений, то есть

$$V = N \cdot n - 3(m_{max} + 1), \quad (50)$$

где N – количество обрабатываемых первичных координат; n – количество точек на интервале сглаживания; m_{max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома [31, 44, 54, 83].

Следовательно, отношение (49) является случайной величиной, распределенной по закону Фишера со степенями свободы 1 и V .

При $a_{\chi k} = 0$ статистика (49) распределена по закону Фишера с параметром нецентральности равным нулю. Эта статистика с заданной доверительной вероятностью не превзойдет порогового уровня $F_{1,v,\alpha}$, определяемого с учетом заданного уровня α значимости (вероятности ложного обнаружения $\alpha = 1 - P$). Сравнивая статистику $F_{1,v}$ с пороговым уровнем $F_{1,v,\alpha}$, можно осуществить проверку гипотезы о равенстве нулю коэффициента $a_{\chi k}$. При этом, если действительно $a_{\chi k} = 0$, то с доверительной вероятностью $P = 1 - \alpha$ будет осуществлено правильное необнаружение коэффициента или с вероятностью α – ложное его обнаружение.

Если $a_{\chi k} \neq 0$, то получим множество распределений Фишера с параметрами нецентральности, не равным нулю. В этом случае сравнение статистики $F_{1,v}$ с тем же пороговым уровнем $F_{1,v,\alpha}$ с вероятностью β приводит к ложному необнаружению коэффициента и с вероятностью $(1 - \beta)$ – к правильному его обнаружению. Вероятность $(1 - \beta)$ называют мощностью критерия [33].

Таким образом, разработаны и исследованы методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, отличающиеся от ранее разработанных тем, что предложенные методы позволяют осуществлять нелинейное сглаживание данных измерений с оптимизацией степени сглаживавшего полинома или с оптимизацией структуры сглаживающего полинома. Экспериментальное исследование разработанных методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, с целью оценки эффективности их функционирования в различных условиях эксплуатации, будет проведено в следующей главе.

2.4 Разработка алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений

На основании исследований, проведенных в предыдущих параграфах, рассмотрим работу алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

При разработке алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений учитывались следующие результаты проведенных исследований [19, 29, 30, 57, 59, 80-83]:

1. Из проанализированных способов обработки данных траекторной информации был выбран способ локально-скользящего сглаживания, так как при данном способе на каждом шаге обработки используется только та часть информации, которая находится в средней части интервала сглаживания, что позволяет получить наиболее точную информацию. При этом было учтено, что другие способы обработки данных траекторной информации по своей сути представляют собой частные случаи локально-скользящего сглаживания.

2. Из разработанных структур ЛНБФ (9) и (10), позволяющих осуществлять совместное описание избыточных (временных и пространственных) данных траекторных измерений, для разработки алгоритмов адаптивного нелинейного

сглаживания данных многопараметрических измерений было принято решение использовать структуру ЛНБФ (10), так как для структуры ЛНБФ (9) существует необходимость нахождения трех составляющих вектора коэффициентов сглаживающего полинома (для каждой вторичной координаты положения ЛА отдельно), а для структуры ЛНБФ (10) в этом нет необходимости, так как в данном случае, вектор коэффициентов сглаживающего полинома состоит из троек элементов вторичных координат ЛА, что в свою очередь упрощает процесс обработки данных.

3. При определении максимально достоверной оценки значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома были применены разработанный итеративный алгоритм и предложенный способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания.

4. Были использованы разработанные методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома: с оптимизацией степени сглаживавшего полинома; с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 и с оптимизацией структуры сглаживающего Структура 2.

Процесс работы разработанных алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений предусматривает [19, 29, 30, 57, 59, 80-83]:

- формирование базы данных для начала вычислительного процесса;
- определение на первом шаге ЛСС начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома;
- определение МДЗ векторов коэффициента сглаживающего полинома и принятие решения о включении значимых коэффициентов в состав полинома;
- определение сглаженных значений вторичных координат пространственного положения ЛА и вывод полученных результатов в удобной для пользователя форме.

Последовательность работы разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений представлена на рисунке 10.

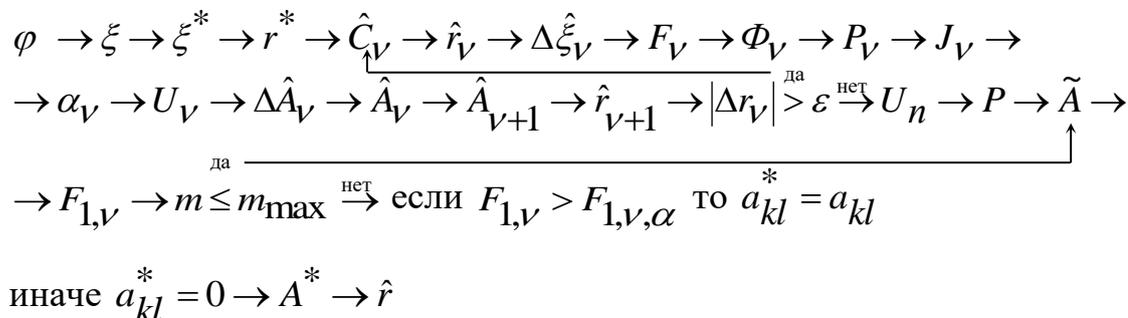


Рисунок 10 – Алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений

Работа алгоритмов может быть представлена следующим образом.

1. Формируется исходная база данных: значения измерений первичных координат (ξ_i^j); количество точек на интервале измерения принятых в обработку (N); количество точек на интервале ЛСС (n), шаг ЛСС и шаг дискретизации; максимально возможная степень сглаживающего полинома (m_{\max}); количество РЛС и ТКС задействованных в обработке данных траекторных измерений.

2. Формируется система ЛНБФ двух переменных t и τ структуры (10) с учетом заданной максимально возможной степени сглаживающего полинома и значений τ_x, τ_y, τ_z .

3. Формируется вектор измерений, на интервале сглаживания, состоящий из $N * n$ точек.

4. Формируется вектор не сглаженных значений вторичных координат [1].

5. Формирование стартовой системы координат на основе местной системы вторичных координат.

6. Проводится оценка коэффициентов сглаживающего полинома (36) на основании результатов полученных в (35).

7. Определяется начальное приближение вектора сглаженных значений вторичных координат (37).

8. Определяются сглаженные значения начального приближения первичных координат (37а).

9. Формируется вектор начального приближения первичных координат (состоящий из $N * n$ точек).

10. Определяется значение вектора отклонений: $\Delta \tilde{\xi}_0 = \xi - \hat{\xi}_0$.

11. Определяются проекции градиентов первичных данных измерений [1, 3, 19, 29, 57].

12. Формируется матрица проекций.

13. По значениям, полученным в пункте 11, формируется матрица Якоби.

14. Проводится построение системы A -ОБФ на основе ЛНБФ двух переменных (27).

15. Формируется матрица вспомогательных коэффициентов α_v (28).

16. Формируется верхняя треугольная матрица U_v (30).

17. Формируется вектор оценки коэффициентов сглаживающего полинома \hat{A}_v (34).

18. Определяется очередное приближение вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома (34).

19. Определяется значение вектора приращений вторичных координат:

$$\Delta \hat{r}_v = P_v \Delta \hat{A}_v.$$

20. Проводится проверка выполнения условия $|\Delta \hat{r}_v| \leq \varepsilon$. При выполнении условия - последнее приближение вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома считается их максимально достоверным значением – переход на следующий этап работы алгоритма. При не выполнении условия – переход на пункт 5 алгоритма.

21. Проводится проверка статистики по критерию Фишера (49).

Проверяется на значимость каждый коэффициент тройки элементов вектора коэффициентов сглаживающего полинома в соответствии с реализуемым методом проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома (с оптимизацией

степени или с оптимизацией структуры Структура 1 или с оптимизацией структуры Структура 2).

По результатам проверки, определяется МДЗ вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома (\hat{A}_{opt}).

22. Проводится определение значений вторичных координат положения ЛА: $\hat{r}_{opt} = P\hat{A}_{opt}$. Полученные значения записываются в базу данных.

23. Осуществляется переход к обработке следующего шага ЛСС (пункт 2).

24. По окончании обработки данных траекторных измерений полученные результаты сглаженных значений вторичных координат положения ЛА предоставляются в удобной для пользователя форме.

Таким образом, в результате выполнения поставленных в диссертационном исследовании задач, построены алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на основе структуры ЛНБФ (10), отличающиеся между собой применяемыми методами проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома: с оптимизацией степени сглаживавшего полинома; с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 и с оптимизацией структуры сглаживающего Структура 2 [19, 29, 30, 57, 59, 80-83].

2.5 Выводы

В результате проведенного исследования были выполнены 1-4 задачи диссертационного исследования.

1. Разработаны и исследованы структуры ЛНБФ (9) и (10), позволяющих осуществлять совместную обработку избыточных (временных и пространственных) данных траекторных измерений, на основе которых были построены и исследованы два способа построения структур Λ -ортогональных базисных функций. Для разработки алгоритмов адаптивного нелинейного

сглаживания данных многопараметрических измерений было принято решение использовать структуру ЛНБФ (10), так как для структуры ЛНБФ (9) существует необходимость нахождения трех составляющих вектора коэффициентов сглаживающего полинома (для каждой вторичной координаты положения ЛА отдельно), а для структуры ЛНБФ (10) в этом нет необходимости, так как в данном случае вектор коэффициентов сглаживающего полинома состоит из троек элементов вторичных координат ЛА, что в свою очередь упрощает процесс обработки данных.

2. Предложен и обоснован способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания, отличающийся от ранее разработанных тем, что на последующем шаге локально-скользящего сглаживания данных измерений нет необходимости нахождения начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, а используется значение, которое было получено на предыдущем шаге локально-скользящего сглаживания.

3. Разработаны и исследованы методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома: с оптимизацией степени сглаживавшего полинома; с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 и с оптимизацией структуры сглаживающего Структура 2.

4. Разработаны алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, отличающиеся от ранее разработанных тем, что позволяют одновременно осуществлять совместную обработку данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью.

Экспериментальное исследование разработанных в настоящей главе алгоритмов на предмет их функционирования в нормальных условиях работы и устойчивости к аномальным ошибкам измерений будет проведено в следующей главе диссертационного исследования.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В главе 3 представлены результаты экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их функционирования в нормальных условиях работы и устойчивости к аномальным ошибкам измерений с применением разработанной системы показателей эффективности и качества. Экспериментальное исследование осуществлялось путём имитационного моделирования на основе разработанной методики проведения эксперимента.

3.1 Критерии оценки функционирования алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений

Для объективного экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений введем систему показателей качества и эффективности результатов их работы.

При разработке системы показателей качества и эффективности работы учитывались требования, предъявляемые к получаемым результатам проводимых испытаний, а также к методам и алгоритмам обработки данных траекторных измерений [3, 84, 86], основным из которых является точность получаемых результатов.

С этой целью введем систему показателей качества и эффективности результатов работы алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных

многопараметрических измерений. Рассмотрим содержание разработанных показателей.

Показатель качества, определяет, во сколько раз точность полученного результата измерений местоположения ЛА в пространстве в i -ой точке j -траектории после сглаживания превышает точность результата измерений до сглаживания.

Выигрыш в точности определяет отношение среднеквадратической ошибки полученных результатов измерений в i -ой точке j -траектории до и после сглаживания [44, 84, 86]:

$$W_{ij} = \frac{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}}}{\hat{\sigma}_{\tilde{\xi}_{ij}}}$$

При проигрыше в точности его величина меньше единицы. Но в любом случае этот показатель принимает положительные значения.

Средний выигрыш в точности по j -траектории (интервале измерения):

$$W_{j\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{ij},$$

где n – число точек на j -траектории (интервале измерения).

Средний выигрыш в точности в i -ой точке по N траекториям:

$$W_{i\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N W_{ij},$$

где N – число обрабатываемых траекторий.

Средний выигрыш в точности по N траекториям, каждая из которых содержит n точек:

$$W_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N W_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N W_{j\text{cp}}.$$

Прежде чем перейти к рассмотрению содержания показателя эффективности, введем понятие - точность при идеальном сглаживании. Под понятием точность при идеальном сглаживании будем понимать результаты сглаживания при точно известной степени (структуре) сглаживающего полинома, осуществляемое МНК или ММП, которое приводит к наилучшим по точности результатам сглаживания [87-99]. Получение таких результатов возможно при моделировании, так как стохастический характер реальных траекторий трудно совместим с их высокой априорной определенностью [44, 84, 86].

Показатель эффективности, определяет отношение приращения результатов точности определения местоположения ЛА в пространстве при сглаживании исследуемым методом к приращению результатов точности, полученных при идеальном сглаживании [44, 84, 86]:

$$\mu_{ij} = \frac{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}} - \hat{\sigma}_{\hat{\xi}_{ij}}}{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}} - \hat{\sigma}_{\hat{\xi}_{ij\text{ид}}}}$$

где $\hat{\sigma}_{\xi_{ij}}$ – оценка СКО в i -ой точке j -траектории до сглаживания; $\hat{\sigma}_{\hat{\xi}_{ij}}$ – оценка СКО в i -ой точке j -траектории после сглаживания; $\hat{\sigma}_{\hat{\xi}_{ij\text{ид}}}$ – оценка СКО в i -ой точке j -траектории после идеального сглаживания.

Для оптимального метода сглаживания, который всегда является бесприигрышным, показатель эффективности равен единице.

Средний показатель эффективности метода по j -траектории:

$$\mu_{j\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_{ij},$$

где μ_{ij} – показатель эффективности в i -ой точке j -траектории.

Средний показатель эффективности метода по N траекториям:

$$\mu_{i\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_{ij}.$$

Средний показатель эффективности метода по N траекториям, каждая из которых содержит n точек:

$$\mu_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \mu_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_{j\text{cp}}.$$

В процессе имитационного моделирования истинные реализации первичных координат суммировались с реализациями ошибок измерений первичных координат, распределенных по нормальному закону [44, 84, 86, 100-105].

Для более детального анализа результатов экспериментального исследования введем дополнительные результаты оценки качества и эффективности работы исследуемых алгоритмов: средний выигрыш качества и средняя эффективность в середине интервала сглаживания, на концах интервала сглаживания и $3/5$ интервала сглаживания.

Введение дополнительных результатов оценки качества и эффективности работы исследуемых алгоритмов обусловлено следующими особенностями обработки траекторной информации.

При обработке стохастических траекторий продолжительностью 10–25с успешно применяется сглаживание в целом. При этом точность получаемых результатов после сглаживания в средней части траектории выше, чем на её концах.

При обработке более длинных стохастических траекторий сложной формы сглаживание в целом сопровождается снижением среднего выигрыша в точности,

так как построение и использование необходимой при этом системы базисных функций высокого порядка сопровождается накоплением ошибок вычислений [71].

Особенностью обработки траекторной информации способом локально-скользящего сглаживания, как уже отмечалось ранее, является то, что длительность интервала сглаживания ограничивают и автоматически перемещают его в ходе обработки с заданным шагом скольжения вдоль траектории. При локально-скользящем сглаживании данных измерений сглаженные значения определяют только для средней части интервала сглаживания, где точность после сглаживания максимальна. Исключения составляют концы траекторий, где используются все сглаженные значения от середины интервала сглаживания до его конца (начала). Если шаг скольжения равен длительности интервала сглаживания, то имеет место кусочно-локальное сглаживание, для которого, как и для сглаживания в целом, характерно использование всех сглаженных значений.

Таким образом, с целью экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений разработана система показателей качества и эффективности результатов работы. Предложенная система позволит провести анализ функционирования разработанных алгоритмов в нормальных условиях работы и в специальных условиях (при введении аномальных ошибок измерений) на всех исследуемых участках траектории: по всему интервалу, в середине интервала, на $3/5$ интервала и на концах интервала сглаживания [44, 84, 86].

3.2 Методика и условия проведения экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их функционирования в нормальных условиях работы и

устойчивости к аномальным ошибкам измерений необходимо для определения наиболее эффективных алгоритмов с целью разработки рекомендаций по их внедрению.

Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, работа которых основана на различных методах проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, подвергались исследованию в одинаковых условиях путём имитационного моделирования [30, 41, 42, 84, 86, 91]. В ходе исследований определялись средние показатели качества и эффективности работы алгоритмов на всех исследуемых участках траектории: по всему интервалу, в середине интервала, на $3/5$ интервала и на концах интервала сглаживания.

Исследованиям подвергались методы сглаживания [3, 30, 84, 86]:

- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией степени сглаживавшего полинома;
- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 1);
- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 2).

Методика эксперимента. Оценка показателей качества и эффективности методов осуществлялась путём имитационного моделирования. Моделировались значения вторичных координат, которые по формулам простых методов [1] пересчитывались в первичные координаты. Затем к полученным значениям первичных координат прибавлялись значения ошибок измерений, распределённых по нормальному закону. Полученные первичные данные измерений подвергались идеальному сглаживанию и нелинейному адаптивному сглаживанию. По результатам обработки оценивались средние показатели качества и эффективности методов [84, 85, 86].

Условия эксперимента [3]:

- значения вторичных координат по осям $X(t)=10000$ м и $Y(t)=10000$ м фиксировались во времени, а координата Z изменялась по закону:

$$Z(t) = \sum_{k=0}^4 b_k (t - t_0)^k,$$

где $Z(t)$ – моделируемые истинные значения Z во времени; t – текущий момент времени; t_0 – момент времени, соответствующий середине интервала сглаживания; b_k – коэффициенты полинома ($b_0 = 10^4$; $b_1 = 50, 100, 150 \text{ с}^{-1}$; $b_2 = 0,5; 10 \text{ с}^{-2}$; $b_3 = 0; 0,5; 1 \text{ с}^{-3}$; $b_4 = 0; 0,5; 0,1 \text{ с}^{-4}$);

- число точек на интервале сглаживания $n = 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 25, 27$;

- частота дискретизации 1 Гц;

- число траекторий, по которым определялись средние показатели качества и эффективности метода, для каждого варианта размещения измерительных средств, равнялось 81 и определялось числом всевозможных сочетаний коэффициентов моделируемого полинома;

- моделировались данные измерений от двух трехкоординатных РЛС с координатами местоположения относительно старта РЛС 1(0, 0, 0) и РЛС 2 (0, 0, 7000);

- среднеквадратическая ошибка измерений по угловым координатам $\sigma_{\alpha, \beta} = 7'; 1'; 0,5'; 0,1'; 0,03'; 0,01'$;

- среднеквадратическая ошибка измерений по дальности $\sigma_R = 40; 15; 1; 0,1 \text{ м}$;

- автокорреляция ошибок измерений моделировалась экспоненциальной зависимостью $\exp(-\varepsilon_{\xi} |\tau_k|)$ с временем корреляции $\tau_k = \varepsilon_{\xi}^{-1} = 0, 1; 3; 5 \text{ с}$ [98];

- поиск оптимальной степени (структуры) сглаживающего полинома осуществлялся по критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95;

- максимально возможная степень сглаживающего полинома принималась равной 6 [3, 44, 84, 86].

Наиболее характерные реализации моделируемых траекторий по координате Z представлены на рисунке 11 [3, 84, 85, 86]. Начало отсчёта совмещено с серединой интервала сглаживания.

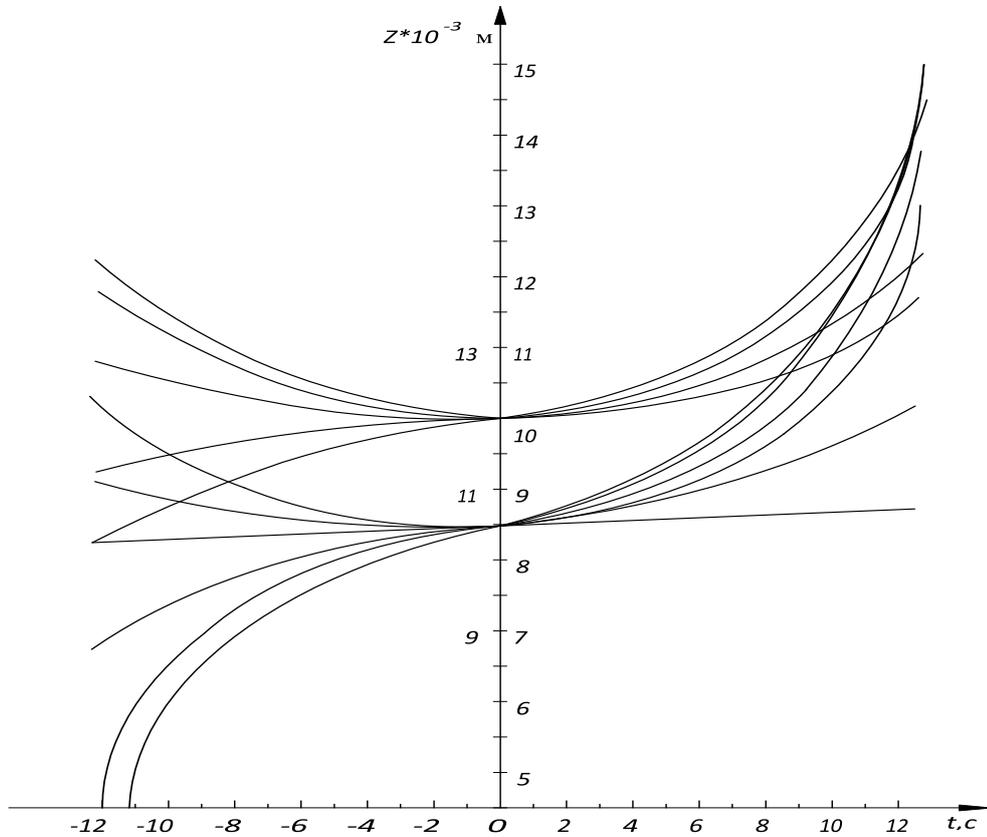


Рисунок 11 – Реализации моделируемых траекторий

На рисунке 11 представлены по 5 типовых реализаций моделируемых траекторий для РЛС 1 (нижние траектории) и для РЛС 2 (5 верхние траектории). Как было указано в условиях эксперимента число траекторий, по которым определялись средние показатели качества и эффективности, для каждого варианта размещения измерительных средств, равнялось 81 и определялось числом всевозможных сочетаний коэффициентов моделируемого полинома. Отображать все полученные в результате моделирования траектории автор не посчитал необходимым, чтобы не загромождать рисунок [3, 84, 85, 86].

Полученные в результате идеального сглаживания траектории были использованы для сравнительного анализа с траекториями исследуемых алгоритмов. Для большей наглядности результаты исследований будут

представлены в следующих параграфах в виде сводных таблиц или рисунков с реализацией отдельных результатов сглаживания данных траекторных измерений.

3.3 Экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов в нормальных условиях работы

В данном параграфе будет проведен анализ и экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их функционирования в нормальных условиях работы при некоррелированных и коррелированных ошибках измерений.

3.3.1 Анализ качества и эффективности работы алгоритмов при некоррелированных ошибках измерений

Для сравнения методов сглаживания обработке подвергались данные многопараметрических измерений с некоррелированными ошибками измерений. СКО по дальности принималась равной 40 м, по угловым координатам 7'. Результаты исследований оценивались по средним показателям качества и эффективности в точках интервала сглаживания по 81 траектории для каждого варианта размещения измерительных средств и различных интервалов сглаживания [3, 84, 85, 86].

Остальные условия эксперимента указаны в параграфе 3.2.

Исследовались разработанные методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, применяемые в разработанных алгоритмах адаптивного нелинейного сглаживания данных траекторных измерений:

- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией степени сглаживающего полинома;

- нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией структуры сглаживающего полинома (Структура 1 и Структура 2) [3, 84, 85, 86].

В ходе исследований определялись средние показатели качества и эффективности результатов работы алгоритмов. Показатель качества при идеальном сглаживании принимался равным единице.

Результаты исследования для каждой точки интервалов сглаживания на интервалах в 25, 21, 17, 13 и 9 точек, представлены в приложении А. В таблице 1 представлены средние значения показателей качества и эффективности исследуемых методов сглаживания для интервалов сглаживания в 25, 21, 17, 13 и 9 точек.

Таблица 1 - Показатели качества и эффективности исследуемых методов сглаживания

Кол-во точек на интервале сглаживания	Анализируемый интервал	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
		степени		структуры 1		структуры 2		
		w	μ	w	μ	w	μ	
25	По интервалу	3,35	0,95	3,45	0,97	3,44	0,97	3,74
	На 3/5 интервала	3,67	0,96	3,76	0,97	3,76	0,97	4,08
	На концах интервала	1,68	0,87	1,75	0,92	1,74	0,92	1,86
21	По интервалу	3,13	0,95	3,20	0,97	3,21	0,97	3,46
	На 3/5 интервала	3,44	0,96	3,51	0,97	3,52	0,97	3,82
	На концах интервала	1,71	0,90	1,76	0,94	1,75	0,93	1,85
17	По интервалу	2,63	0,92	2,73	0,94	2,68	0,93	3,00
	На 3/5 интервала	2,91	0,94	3,02	0,96	2,97	0,95	3,29
	На концах интервала	1,58	0,86	1,60	0,88	1,58	0,87	1,73
13	По интервалу	2,35	0,91	2,41	0,92	2,36	0,90	2,69
	На 3/5 интервала	2,64	0,93	2,72	0,94	2,65	0,93	3,10
	На концах интервала	1,57	0,90	1,58	0,90	1,54	0,85	1,66
9	По интервалу	2,06	0,93	2,17	0,97	2,09	0,94	2,21
	На 3/5 интервала	2,35	0,95	2,45	0,97	2,34	0,94	2,50
	На концах интервала	1,52	0,96	1,53	0,98	1,49	0,91	1,54

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Методы нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома превосходят по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией степени сглаживающего полинома.

2. Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 превосходит по показателям качества и эффективности метод с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 2.

3. Наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности для всех исследуемых методов достигаются в средней части в пределах $3/5$ интервала сглаживания.

4. Для всех исследуемых методов показатели качества и эффективности снижаются на краях интервала сглаживания [83- 86].

На рисунках 12-16 представлен графический анализ показателей качества работы исследуемого алгоритма при 9, 13, 17, 21 и 25 точках на интервалах сглаживания. Начало отсчета совмещено с серединой интервала сглаживания.

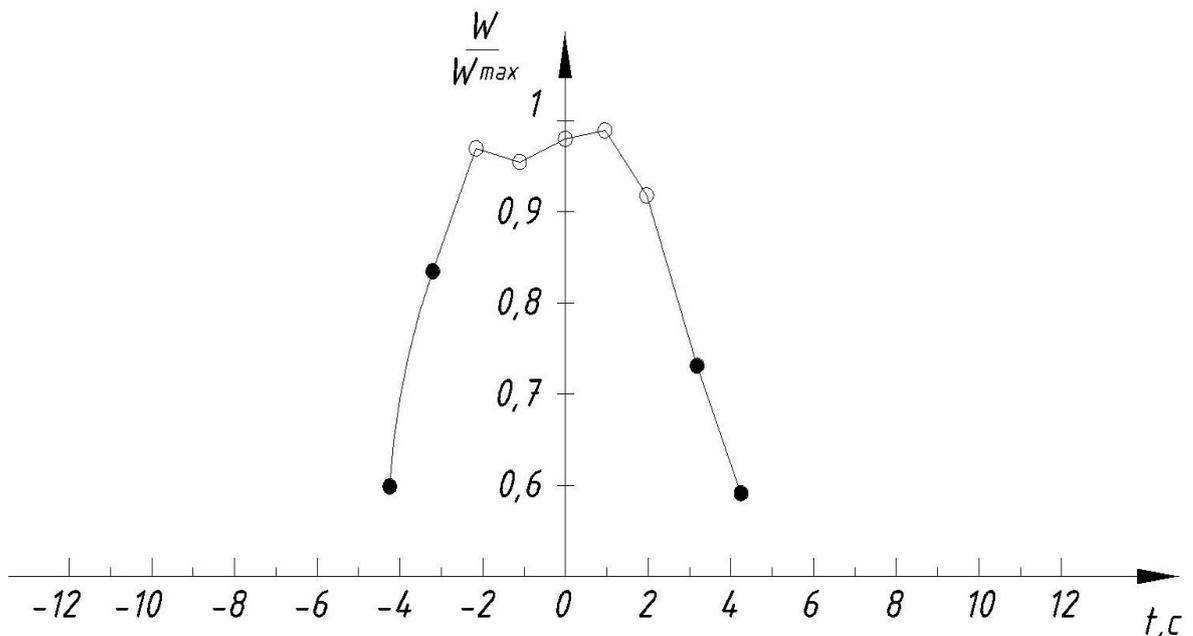


Рисунок 12 – Средний выигрыш в точности на интервале сглаживания ($n=9$)

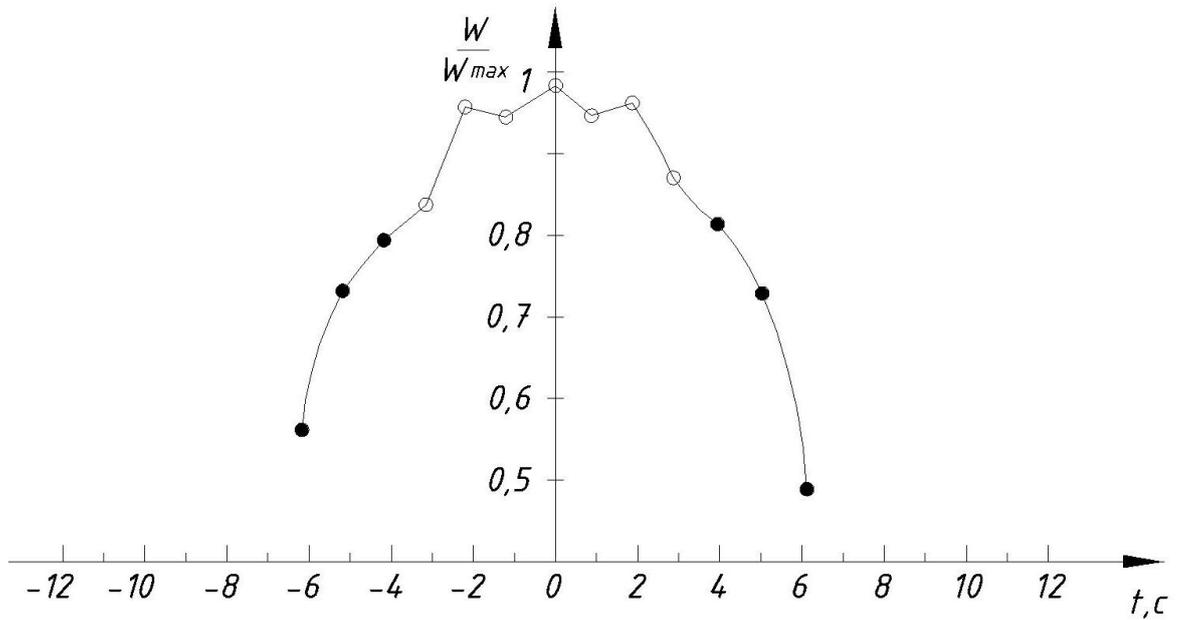


Рисунок 13 – Средний выигрыш в точности на интервале сглаживания ($n=13$)

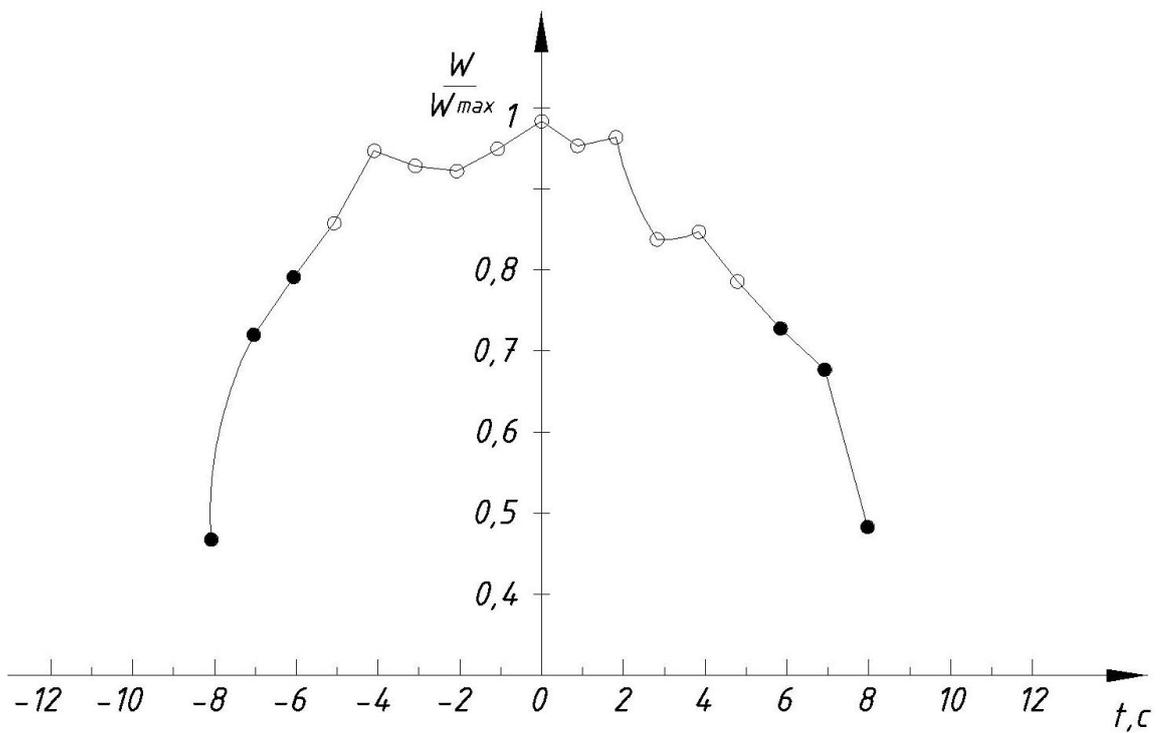


Рисунок 14 – Средний выигрыш в точности на интервале сглаживания ($n=17$)

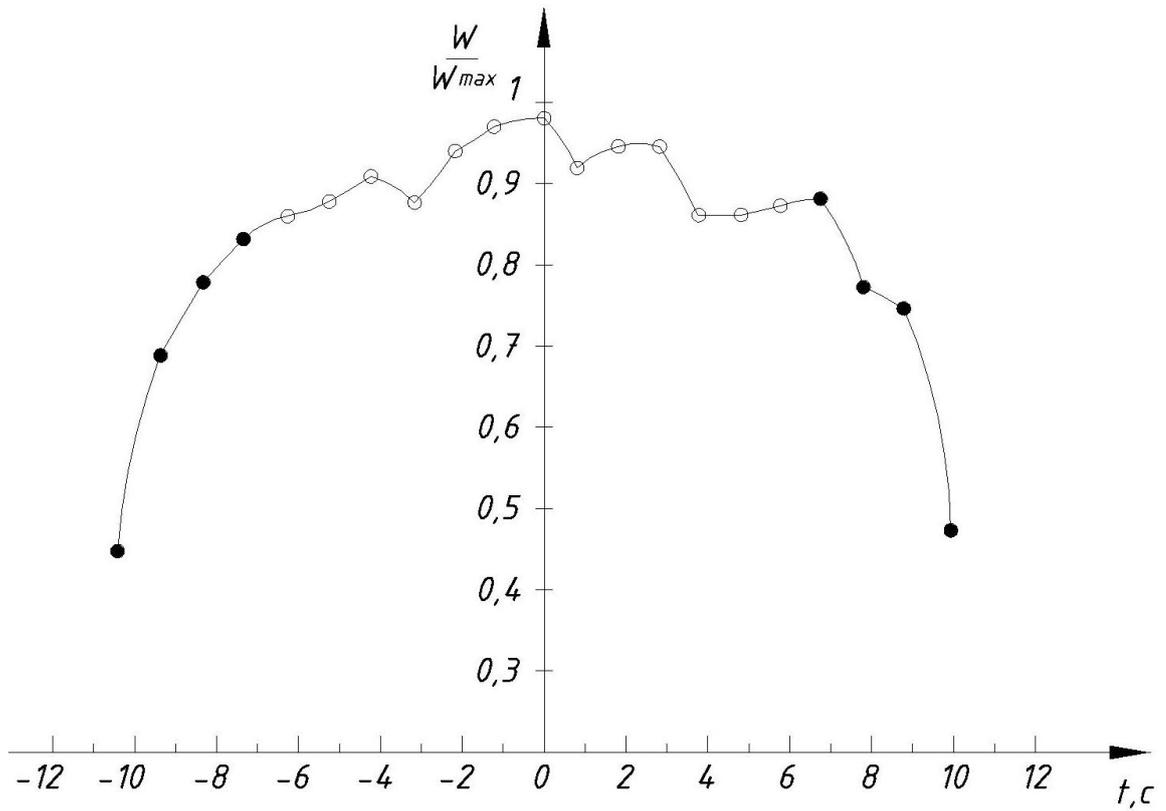


Рисунок 15 – Средний выигрыш в точности на интервале сглаживания (n=21)

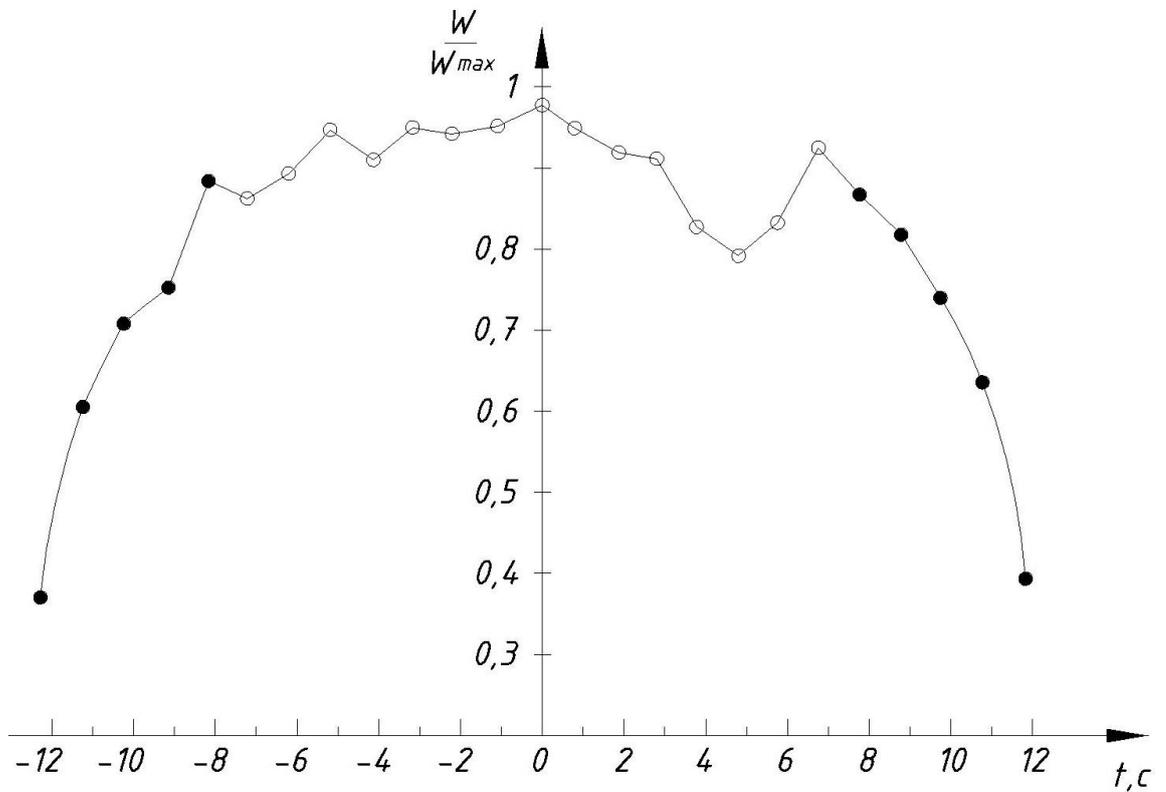


Рисунок 16 – Средний выигрыш в точности на интервале сглаживания (n=25)

На представленных рисунках наглядно отображены результаты работы алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений, по которым можно сделать следующий вывод.

1. Наибольшие значения выигрыша в качестве на всех представленных рисунках достигаются в средней точке интервала сглаживания.

2. Наибольшие значения выигрыша в качестве на всех представленных рисунках достигаются в средней части в пределах $3/5$ интервала сглаживания.

3. На всех представленных рисунках показатели качества снижаются на краях интервала сглаживания [83- 86].

Дальнейшим исследованиям подвергался алгоритм с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 (в дальнейшем просто структуры) с использованием данных, поступающих от двух трехкоординатных РЛС с координатами местоположения относительно старта РЛС 1 (0, 0, 0) и РЛС 2 (0, 0, 7000). Остальные условия аналогичны указанным в параграфе 3.2.

Основные результаты исследований показателей качества и эффективности алгоритма оптимизации структуры сглаживающего полинома [83-86] с некоррелированными ошибками измерений с количеством 27, 19 и 11 точек на интервалах сглаживания представлены в таблицах 2–4.

Таблица 2 – Показатели качества и эффективности алгоритма оптимизации структуры сглаживающего полинома с некоррелированными ошибками измерений

Точек на интервале	СКО R, м	СКО α , угл. мин	СКО β , угл. мин	Показатели			Условия усреднения
				эффективности	качества		
					$\mu_{ср}$	$W_{ср}$	
27	40	7	7	0,949	4,841	5,146	по интервалу
				0,970	5,364	5,664	в ср. точке
				0,974	5,142	5,387	на $3/5$ инт.
				0,931	2,356	2,524	на конц. инт.

Продолжение таблицы 2

27	40	1	1	0,967	4,716	5,059	по инт.
				0,973	5,139	5,471	в ср. точке
				0,971	4,978	5,182	на 3/5 инт.
				0,937	2,294	2,407	на конц. инт.
27	5	1	1	0,956	4,536	4,764	по интервалу
				0,978	4,982	5,107	в ср. точке
				0,976	4,806	4,916	на 3/5 инт.
				0,933	2,128	2,273	на конц. инт.
27	5	0,5	0,5	0,969	4,474	4,750	по интервалу
				0,973	4,997	5,374	в ср. точке
				0,976	4,811	5,132	на 3/5 инт.
				0,933	2,261	2,348	на конц. инт.
27	1	0,1	0,1	0,969	4,467	4,728	по интервалу
				0,973	4,896	5,346	в ср. точке
				0,976	4,749	5,072	на 3/5 инт.
				0,933	2,134	2,312	на конц. инт.
27	0,1	0,03	0,03	0,967	4,458	4,741	по инт.
				0,973	4,872	5,212	в ср. точке
				0,974	4,780	5,081	на 3/5 инт.
				0,974	2,214	2,341	на конц. инт.
27	0,1	0,01	0,01	0,969	4,473	4,749	по интервалу
				0,978	4,963	5,330	в ср. точке
				0,976	4,809	5,086	на 3/5 инт.
				0,933	2,196	4,304	на конц. инт.

Таблица 3 – Показатели качества и эффективности алгоритма оптимизации структуры сглаживающего полинома с некоррелированными ошибками измерений

Точек на интервале	СКО R, м	СКО α , угл. мин	СКО β , угл. мин	Показатели			Условия усреднения
				эффективности	качества		
					$\mu_{\text{ср}}$	$W_{\text{ср}}$	
19	40	7	7	0,968	4,326	4,501	по интервалу
				0,986	4,407	4,557	в ср. точке
				0,988	4,389	4,492	на 3/5 инт.
				0,924	2,342	2,406	на конц. инт.
19	40	1	1	0,971	4,775	4,934	по интервалу
				0,982	5,116	5,376	в ср. точке
				0,979	5,089	5,305	на 3/5 инт.
				0,937	2,673	2,729	на конц. инт.
19	5	1	1	0,958	4,280	4,596	по интервалу
				0,977	4,548	4,859	в ср. точке
				0,975	4,452	4,792	на 3/5 инт..
				0,918	2,285	2,462	на конц. инт.
19	5	0,5	0,5	0,965	4,275	4,573	по интервалу
				0,981	4,537	4,829	в ср. точке
				0,978	4,426	4,771	на 3/5 инт.
				0,921	2,244	2,443	на конц. инт.
19	1	0,1	0,1	0,966	4,241	4,552	по интервалу
				0,983	4,519	4,796	в ср. точке
				0,981	4,397	4,738	на 3/5 инт.
				0,914	2,231	2,427	на конц. инт.
19	0,1	0,03	0,03	0,958	4,223	4,539	по интервалу
				0,976	4,497	4,785	в ср. точке
				0,974	4,378	4,731	на 3/5 инт.
				0,911	2,219	2,417	на конц. инт.
19	0,1	0,01	0,01	0,967	4,227	4,548	по интервалу
				0,983	4,506	4,792	в ср. точке
				0,982	4,389	4,737	на 3/5 инт.
				0,915	2,225	2,423	на конц. инт.

Таблица 4 – Показатели качества и эффективности алгоритма оптимизации структуры сглаживающего полинома с некоррелированными ошибками измерений

Точек на интервале	СКО R, м	СКО α , угл. мин	СКО β , угл. мин	Показатели			Условия усреднения
				эффективности	качества		
					$\mu_{\text{ср}}$	$W_{\text{ср}}$	
11	40	7	7	0,957	2,806	3,258	по интервалу
				0,994	3,270	3,615	в ср. точке
				0,971	3,233	3,603	на 3/5 инт.
				0,998	2,216	2,234	на конц. инт.
11	40	1	1	0,926	2,649	2,947	по интервалу
				0,938	3,004	3,265	в ср. точке
				0,947	2,878	3,084	на 3/5 инт.
				0,914	2,103	2,197	на конц. инт.
11	5	1	1	0,939	2,438	2,731	по интервалу
				0,941	2,741	2,958	в ср. точке
				0,964	2,609	2,714	на 3/5 инт.
				0,970	1,856	1,906	на конц. инт.
11	5	0,5	0,5	0,920	2,267	2,343	по интервалу
				0,915	2,604	2,924	в ср. точке
				0,953	2,519	2,672	на 3/5 инт.
				0,912	1,792	1,815	на конц. инт.
11	1	0,1	0,1	0,952	2,243	2,497	по интервалу
				0,955	2,586	2,792	в ср. точке
				0,960	2,498	2,681	на 3/5 инт.
				0,974	1,754	1,842	на конц. инт.
11	0,1	0,03	0,03	0,943	2,217	2,468	по интервалу
				0,974	2,539	2,764	в ср. точке
				0,949	2,443	2,652	на 3/5 инт.
				0,986	1,735	1,786	на конц. инт.
11	0,1	0,01	0,01	0,946	2,234	2,495	по интервалу
				0,948	2,562	2,783	в ср. точке
				0,957	2,471	2,674	на 3/5 инт.
				0,970	1,746	1,798	на конц. инт.

Анализ проведенных экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Алгоритм сохраняет работоспособность в заданном диапазоне СКО измерений.
2. Средние показатели качества и эффективности практически сохраняют свои значения при изменении СКО измерительных средств.
3. Наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности для всех исследуемых интервалов сглаживания достигаются в средней части и в пределах $3/5$ интервала сглаживания.
4. Для всех исследуемых интервалов сглаживания показатели качества и эффективности снижаются на краях интервала сглаживания.
5. Проигрышей в точности не наблюдалось [83-86].

3.3.2 Анализ качества и эффективности работы алгоритмов при коррелированных ошибках измерений

Дальнейшие экспериментальные исследования алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений с оптимизацией структуры сглаживающего полинома проводились на данных измерениях при коррелированных ошибках. Новым фактором здесь является то, что корреляция ошибок измерений есть, но при обработке не учитывается. Как правило, так и бывает в настоящее время в практике траекторных измерений.

При исследовании алгоритма использовались данные многопараметрических измерений двух РЛС с коррелированными ошибками. Координаты РЛС 1 (0, 0, 0) и РЛС 2 (0, 0, 7000). Остальные условия аналогичны указанным в параграфе 3.2.

Основные результаты исследований сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Показатели качества при работе алгоритма при коррелированных ошибках измерений

Число точек на интервале сглаживания	Время корреляции, с	Показатели качества			
		по интервалу	в средней точке	на 3/5 интервала	на концах интервала
9	0	2,167	2,490	2,453	1,580
	1	1,762	1,988	1,905	1,387
	3	1,520	1,591	1,546	1,405
	5	1,452	1,494	1,465	1,378
13	0	2,413	2,629	2,715	1,583
	1	1,883	2,037	2,054	1,357
	3	1,592	1,654	1,671	1,306
	5	1,524	1,560	1,580	1,305
17	0	2,725	2,958	3,017	1,596
	1	2,047	2,301	2,232	1,388
	3	1,653	1,752	1,731	1,360
	5	1,570	1,647	1,614	1,390
21	0	3,200	3,909	3,508	1,761
	1	2,200	2,320	2,340	1,512
	3	1,682	1,659	1,734	1,429
	5	1,588	1,581	1,620	1,395
25	0	3,439	3,866	3,761	1,800
	1	2,417	2,794	2,634	1,529
	3	1,782	1,937	1,874	1,387
	5	1,652	1,728	1,709	1,392

В таблице 5 представлены показатели качества при работе алгоритма с числом точек на интервале сглаживания ($n=9, 13, 17, 21, 25$), при времени корреляции ошибок измерений равным 0, 1, 3, 5 с.

Анализ качества и эффективности работы алгоритмов при коррелированных ошибках измерений позволяет следующие заключения.

1. Наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности для всех исследуемых интервалов сглаживания достигаются в средней части и в пределах 3/5 интервала сглаживания. При этом наилучшие результаты сглаживания, получаются в случаях, когда длительность интервала сглаживания превышает время корреляции ошибок измерений в 1,5 и более раз.

2. Для всех исследуемых интервалов сглаживания показатели качества и эффективности снижаются на краях интервала сглаживания.

3. Проигрышей в точности не наблюдалось [83-86].

3.4 Экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений

В данном параграфе будет проведен анализ и экспериментальное исследование функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений.

3.4.1 Методика проведения экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений

Анализ проведенных в предыдущем параграфе экспериментальных исследований показал, что разработанные алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, обеспечивают заданную условиями эксперимента точность определения местоположения ЛА в нормальных условиях работы при коррелированных и некоррелированных ошибках измерений. Также было установлено, что из всех разработанных алгоритмов, наилучшими показателями качества и эффективности результатов обработки внешнетраекторных данных измерений обладает алгоритм, построенный на основе метода нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1.

Исходя из этого, проведение экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений будет осуществляться с применением вышеназванного алгоритма.

Целью проведения экспериментального исследования разработанного алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений состоит в проверке работоспособности при введении в данные траекторных измерений аномальных ошибок, которые теоретически возможны при проведении реальных испытаний ЛА [83-86].

Экспериментальное исследование проводилось на типовой траектории ЛА – петли Нестерова (рисунок 17), с применением трех кинотеодолитных и трех радиолокационных станций. Обработке подвергались данные многопараметрических измерений, полученные путём моделирования [100-105].

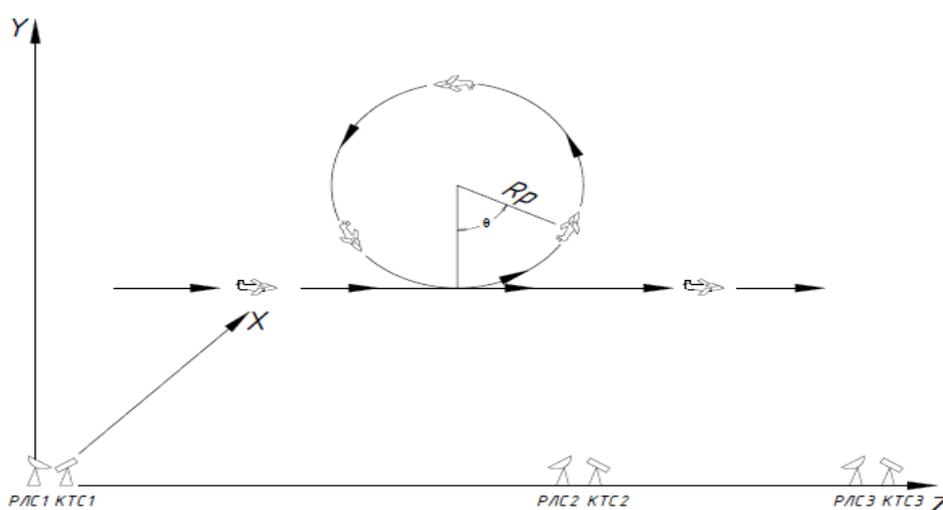


Рисунок 17 – Модель петли Нестерова

Методика проведения экспериментального исследования представляет собой следующую последовательность:

1. Ввод служебной информации и необходимых данных для начала процесса измерения:

- данные, полученные от РЛС и КТС, их координаты, интервал измерений, интервал сглаживания, шаг дискретизации, максимальная степень сглаживающего полинома, шаг ЛСС;

- устранение систематических ошибок до начала обработки путем введения поправок;

- определение количества первичных средств измерений – РЛС и КТС, участвующих в обработке получаемых данных;

- вычисление количества первичных данных измерений, участвующих в обработке, на интервале ЛСС, определение середины интервала сглаживания и другие вспомогательные величины, необходимые для функционирования программного обеспечения;

- ввод данных измерений и формирование массива данных измерений.

2. Получение первичных координат:

- формирование ЛНБФ двух переменных в зависимости от максимально возможной степени сглаживающего полинома и числа точек на интервале сглаживания;

- вычисление основной матрицы системы $\varphi^T \varphi$;

- нахождение обратной матрицы системы уравнений $(\varphi^T \varphi)^{-1}$ и вычисление матричного произведения $(\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T$ для нахождения оценки коэффициентов сглаживающего полинома;

- вычисление диагональных элементов весовой матрицы и вычисление количества шагов ЛСС;

- формирование массива данных измерений на текущем шаге ЛСС.

3. Расчет вторичных координат:

- вычисление вторичных координат и формирование вектора столбца вторичных координат;

- нахождение начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома;

- нахождение начального приближения вторичных координат объекта в пространстве;

- подготовка массивов для начала итеративного приближения, переприсваивание массивов и начало итеративного приближения к МДЗ положения объекта в пространстве;

- вычисление первичных координат и проекций градиентов на каждом шаге приближения к МДЗ положения объекта в пространстве;

- вычисление вектора отклонений данных измерений от вычисленных первичных координат.

4. Формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров:

- формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров положения на первом шаге ЛСС;

- формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров положения со второго до предпоследнего шага ЛСС;

- формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров положения на последнем шаге ЛСС.

5. Вывод сглаженных значений вторичных параметров положения объекта в пространстве.

6. Сравнение полученных результатов с нормативными требованиями.

7. Представление полученных результатов о соответствии бортовых систем заданным требованиям в удобной для пользователя форме [83-86].

Результаты исследования проведенного эксперимента будут рассмотрены в следующем параграфе.

3.4.2 Анализ функционирования разработанных алгоритмов на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений

На основе разработанной методики проведения экспериментального исследования функционирования алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их устойчивости к аномальным ошибкам измерений было проведено математическое моделирование ситуации с введением грубых ошибок измерений в дальность измерения для РЛС № 1, и сбоев (одиночных и групповых) в получаемые результаты измерений.

Моделирование данных измерений осуществлялось исходя из следующих условий:

- для $t = 1, \dots, 25$ фиксировались во времени вторичные координаты $X(t) = 10000$ м, и $Y(t) = 1000$ м, а координата $Z(t)$ изменялась во времени по закону:

$$Z(t) = 210t;$$

- для $t = 26, \dots, 75$ фиксировалась во времени вторичная координата $X(t) = 10000$ м, а координаты $Y(t)$ и $Z(t)$ изменялись во времени по закону:

$$Y(t) = Y_0 + R_p \cos(180 - \theta);$$

$$Z(t) = Z_0 + R_p \sin \theta, R_p = 1500,$$

$$\theta = 7,2(t - 25), Z_0 = Z(25), Y_0 = 1000 + R_p;$$

- для $t = 76, \dots, 100$ фиксировались во времени вторичные координаты $X(t) = 10000$ м, и $Y(t) = 1000$ м, а координата $Z(t)$ изменялась во времени по закону:

$$Z(t) = 210(t - 50);$$

где $X(t), Y(t), Z(t)$ – моделируемые истинные значения вторичных координат во времени; t – текущий момент времени; Y_0, Z_0 – координаты центра петли с радиусом R_p ; θ – угол между осью OY и подвижным радиусом вектора R_p);

- число точек на интервале измерения (на траектории) принималось равным 100 при частоте дискретизации 1 Гц;

- число точек на интервале локально-скользящего сглаживания $n=9, 13, 17, 21, 25$ при частоте дискретизации 1 Гц;

- в ходе моделирования получены данные измерений от трёх трехкоординатных РЛС и трех КТС. Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств относительно начала отсчёта (старта) и среднеквадратические ошибки приведены в таблице 5;

- автокорреляция ошибок измерений определялась экспоненциальной зависимостью [102].

Для быстрофлуктуирующих ошибок измерений, составляющих приблизительно половину среднеквадратической ошибки измерений, время корреляции принято равным 3с для радиолокационных измерений и 1с для кинотеодолитных измерений; медленно-флуктуирующие ошибки измерений, составляющие вторую половину СКО измерений, получены путём суммирования с истинными значениями измеряемых первичных координат случайной величины, остававшейся неизменной на всем интервале измерений;

- грубые ошибки измерений (сбои) вводились в дальность, измеренную РЛС №1, и составляли +400, минус 400 м, и минус1000 м; сбои вводились одиночные +400, минус 400 м, минус1000 м и групповые (три сбоя подряд) +400 и минус 400 м по дальности РЛС №1 [1, 3, 83-86].

Экспериментальному исследованию подвергался алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома
Структура 1.

Работа алгоритма оценивалась по показателю качества.

Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств относительно начала отсчёта и среднеквадратические ошибки измерений приведены в таблицах 6–8.

Результаты экспериментального исследования представлены в таблицах 9–13 [83-86].

Таблица 6 – Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств относительно начала отсчёта и среднеквадратические ошибки измерений

Тип станции	N	Координаты станций относительно старта			СКО измерений			Варианты обработки				
		x_m	y_m	z_m	R_m	α'	β'	1	2	3	4	5
РЛС	1	0	0	0	40	7	7	+	+	+	+	+
РЛС	2	0	0	8000	40	7	7	-	-	+	+	+
РЛС	3	0	0	11000	40	7	7	-	-	-	+	+
КТС	1	0	0	0	-	1	1	-	+	-	-	+
КТС	2	0	0	8000	-	1	1	-	-	-	-	+
КТС	3	0	0	11000	-	1	1	-	-	-	-	+

Таблица 7 – Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств относительно начала отсчёта и среднеквадратические ошибки измерений

Тип станции	N	Координаты станций относительно старта			СКО измерений			Варианты обработки			Величина сбоя
		x_m	y_m	z_m	R_m	α'	β'	1	2	3	
РЛС	1	0	0	0	40	7	7	+	+	+	по R 400 м
РЛС	2	0	0	8000	40	7	7	-	+	+	нет
РЛС	3	0	0	11000	40	7	7	-	-	+	нет

Таблица 8 – Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств относительно начала отсчёта и среднеквадратические ошибки измерений

Тип станции	N	Координаты станций относительно старта			СКО измерений			Варианты обработки			Величина сбоя
		x_m	y_m	z_m	R_m	α'	β'	1	2	3	
РЛС	1	0	0	0	40	7	7	+	+	+	по R 1000 м
РЛС	2	0	0	8000	40	7	7	-	+	+	нет
РЛС	3	0	0	11000	40	7	7	-	-	+	нет

В таблице 9 представлены результаты обработки данных многопараметрических измерений без сбоев ($n = 9, 13, 17, 21, 25$).

Таблица 9 – Результаты апробации при обработке данных многопараметрических измерений без сбоев

Точек на инт. сгл.	Выигрыш в точности															W_{Σ}
	РЛС1			КТС1		РЛС2			КТС2		РЛС3			КТС3		
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_{α}	W_{β}	
9	1,01	1,11	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09
	1,03	4,83	3,82	1,05	1,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,14
	2,34	1,19	1,28	-	-	1,08	1,40	2,03	-	-	-	-	-	-	-	1,55
	4,16	1,63	2,00	-	-	1,85	2,14	3,44	-	-	2,05	1,66	2,54	-	-	2,38
	16,2	4,18	11,9	0,91	3,36	5,71	11,2	20,0	1,37	1,32	5,55	9,90	16,5	1,50	2,57	7,76
13	1,01	1,12	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09
	1,03	4,65	3,78	1,01	1,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,09
	2,61	1,24	1,28	-	-	1,78	1,64	2,05	-	-	-	-	-	-	-	1,67
	4,50	1,69	1,94	-	-	1,94	2,39	3,45	-	-	2,14	1,82	2,57	-	-	2,49
	15,8	4,10	11,8	0,89	3,34	5,65	9,63	19,1	1,18	1,26	5,40	8,84	15,6	1,34	2,44	7,41
17	1,01	1,19	1,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,11
	1,01	4,62	3,62	1,00	1,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,05
	2,50	1,18	1,27	-	-	1,12	1,62	2,04	-	-	-	-	-	-	-	1,62
	4,20	1,62	1,84	-	-	1,82	2,26	3,31	-	-	2,01	1,72	2,45	-	-	2,36
	16,0	3,99	9,24	0,87	2,61	5,69	8,35	14,2	1,02	0,94	5,49	8,19	11,8	1,25	1,84	6,60
21	1,02	1,19	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,12
	1,03	4,54	3,32	0,99	0,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,97
	2,39	1,16	1,30	-	-	1,09	1,44	2,08	-	-	-	-	-	-	-	1,57
	4,16	1,54	1,97	-	-	1,80	2,16	3,49	-	-	1,98	1,69	2,61	-	-	2,38
	15,8	3,95	6,47	0,86	1,82	5,71	7,50	9,58	0,92	0,63	5,51	7,41	7,95	1,13	1,24	5,75
25	1,03	1,18	1,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,12
	1,02	4,42	2,89	0,96	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,85
	2,49	1,18	1,29	-	-	1,13	1,54	2,09	-	-	-	-	-	-	-	1,62
	4,30	1,59	1,94	-	-	1,84	2,32	3,44	-	-	2,03	1,77	2,57	-	-	2,42
	15,6	3,84	4,43	0,83	1,25	5,73	6,40	6,42	0,78	0,42	5,51	6,44	5,33	0,98	0,83	5,09

Из результатов экспериментального исследования, приведенных в таблице 9, можно сделать вывод, что с увеличением избыточности полученных данных выигрыш в точности для РЛС составляет от 1,09 до 2,38 раз. При совместной обработке данных РЛС и КТС выигрыш в точности составляет 2,14 – 7,76 раз [83-86].

В таблицах 10 – 14 – представлены полученные результаты при введении сбоев в данные измерений РЛС № 1, при $n = 9$.

Таблица 10 – Результаты апробации при наличии одиночного сбоя + 400 м по дальности, измеренной РЛС 1

Вариант обработки	РЛС1			РЛС2			РЛС3			W_{Σ}
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	
1	1,270	1,076	1,091	-	-	-	-	-	-	1,146
2	2,998	1,167	1,279	1,112	1,516	2,025	-	-	-	1,683
3	4,887	1,529	1,987	1,718	2,234	3,440	1,895	1,681	2,545	2,435

Таблица 11 – Результаты апробации при наличии три сбоя подряд по + 400 м каждый измеренной РЛС 1

Вариант обработки	РЛС1			РЛС2			РЛС3			W_{Σ}
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	
1	1,154	0,927	0,975	-	-	-	-	-	-	1,019
2	3,434	1,093	1,273	0,973	1,291	2,008	-	-	-	1,678
3	5,084	1,349	2,013	1,370	1,882	3,468	1,533	1,335	2,570	2,289

Таблица 12 – Результаты апробации при наличии один сбой минус 400 м по дальности, измеренной РЛС 1

Вариант обработки	РЛС1			РЛС2			РЛС3			W_{Σ}
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	
1	1,071	1,018	0,999	-	-	-	-	-	-	1,029
2	2,625	1,158	1,261	0,928	1,065	1,982	-	-	-	1,503
3	4,561	1,615	1,930	1,557	1,738	3,311	1,779	1,310	2,352	2,239

Таблица 13 – Результаты апробации при наличии три сбоя подряд по минус 400 м каждый в дальности, измеренной РЛС 1

Вариант обработки	РЛС1			РЛС2			РЛС3			W_{Σ}
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	
1	1,209	1,035	1,084	-	-	-	-	-	-	1,109
2	1,843	1,136	1,260	0,772	0,793	1,964	-	-	-	1,461
3	4,695	1,577	1,876	1,264	1,243	3,114	1,495	0,945	2,090	2,033

Таблица 14 – Результаты апробации при наличии один сбой минус 1000 м по дальности, измеренной РЛС1

Вариант обработки	РЛС1			РЛС2			РЛС3			W_{Σ}
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	
1	1,563	0,959	0,433	-	-	-	-	-	-	0,985
2	3,628	1,149	1,149	0,776	0,747	1,836	-	-	-	1,548
3	5,757	1,558	1,814	1,235	1,122	2,941	1,478	0,870	1,938	2,079

Из результатов экспериментального исследования, приведенных в таблицах 9 – 13, видно, что при обработке данных со сбоем средний выигрыш в точности возрастает с увеличением избыточности обрабатываемой информации [83-86].

На рисунках 18 - 20 представлены временные графики зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат без сбоя и с одиночным сбоем + 400 м, при $n = 9$.

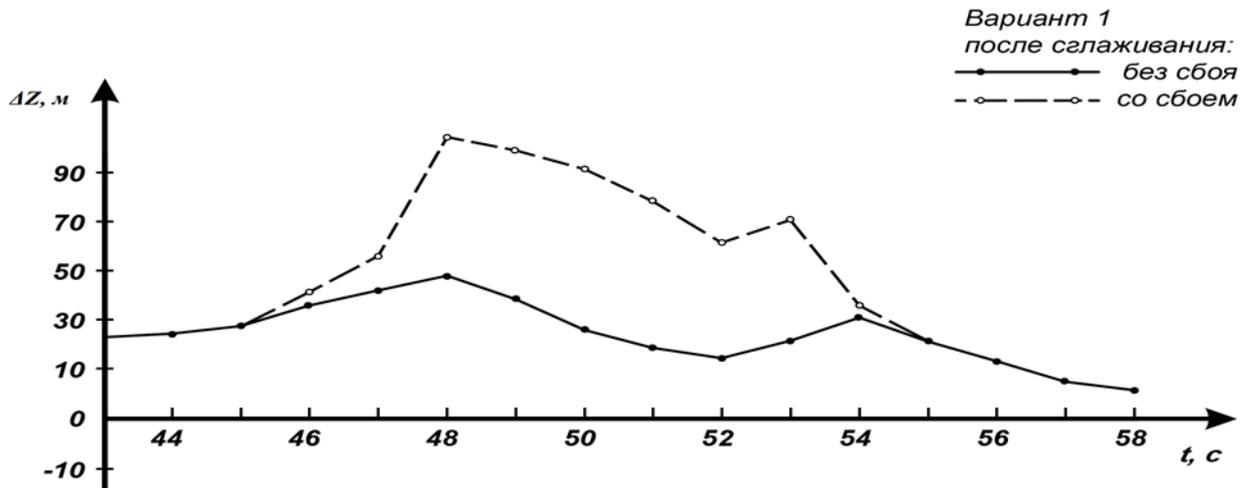


Рисунок 18 – График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1

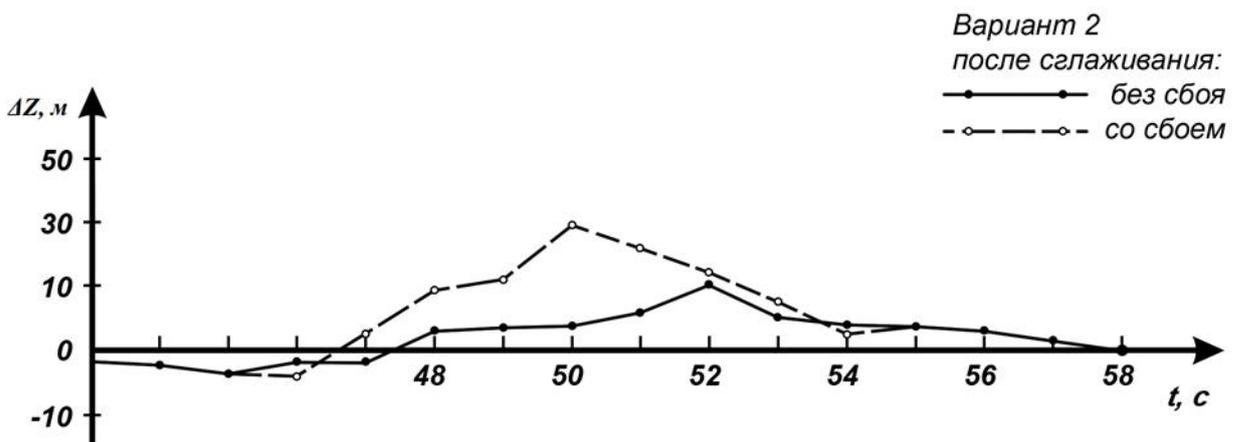


Рисунок 19 – График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1 и РЛС 2

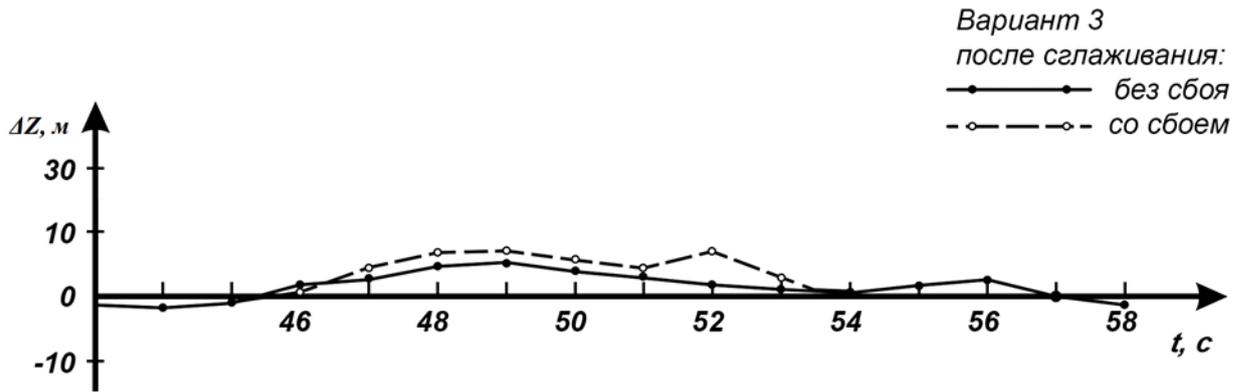


Рисунок 20 – График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1, РЛС 2, РЛС 3

Из приведенных графиков видно, что разность между полученными сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат при одиночном сбое = 400 м уменьшается с увеличением количества РЛС участвующих в обработке данных траекторных измерений, то есть средний выигрыш в точности возрастает с увеличением избыточности обрабатываемой информации [83-86].

В приложении Б представлены полученные в результате исследования (для всех вариантов вводимых аномальных ошибок измерений) графики зависимостей (от времени) разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания (без сбоев и со сбоем) для трех вариантов обработки при числе точек на интервале сглаживания $n = 9$ и графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями).

Анализ проведенного экспериментального исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. Алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1, сохранил работоспособность при воздействии аномальных

ошибок измерений и показал себя устойчивым при обработке данных измерений со сбоями и грубыми ошибками измерений по дальности.

2. С увеличением степени избыточности данных измерений уменьшаются как быстро флуктуирующие, так и медленно флуктуирующие ошибки измерений.

3. Величина выброса в результате сглаживания, по мере увеличения степени избыточности, уменьшается:

- для одиночного сбоя 400 м в 2,5–7,6 раз;
- для группового сбоя 400 м в 1,3–5,7 раз;
- для одиночного сбоя 1000 м в 3,9–12,5 раз [83-86].

3.5 Выводы

По результатам экспериментального исследования функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их функционирования в нормальных условиях работы и устойчивости к аномальным ошибкам измерений можно сделать следующий вывод.

Экспериментальное исследование осуществлялось путём имитационного моделирования на основе предложенной методики проведения эксперимента по разработанной системе показателей качества и эффективности результатов работы исследуемых алгоритмов. Анализ функционирования разработанных алгоритмов проводился на всех исследуемых участках траектории: по всему интервалу, в середине интервала, на $3/5$ интервала и на концах интервала сглаживания.

Исследованиям подвергались алгоритмы нелинейного оптимального сглаживания данных многопараметрических измерений построенные на следующих методах сглаживания: нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией степени сглаживавшего полинома и нелинейное адаптивное

сглаживание с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 и Структура 2.

Результаты исследования показали, что алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, построенные на основе метода нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома, превосходят по показателям качества и эффективности алгоритм, построенный на основе метода с оптимизацией степени сглаживающего полинома, при этом метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 превосходит по показателям качества и эффективности метод Структура 2.

Для всех исследуемых алгоритмов как при коррелированных, так и при некоррелированных ошибках измерений, наибольшие значения выигрыша в качестве и эффективности достигаются в средней части в пределах $3/5$ интервала сглаживания и снижаются на краях интервала сглаживания.

В случае совместной обработки данных двух РЛС с некоррелированными ошибками измерений: при оптимизации степени сглаживающего полинома средний показатель эффективности оценок параметров положения μ и средний выигрыш в точности W составляют: по интервалу – $\mu = 0,93$, $W = 2,7$; в середине интервала – $\mu = 0,95$, $W = 3,03$; на $3/5$ интервала – $\mu = 0,95$, $W = 3,0$; на концах интервала – $\mu = 0,90$, $W = 1,6$; при оптимизации структуры сглаживающего полинома средний показатель эффективности оценок параметров положения μ и средний выигрыш в точности W составляют: по интервалу – $\mu = 0,95$, $W = 2,8$; в середине интервала – $\mu = 0,98$, $W = 3,1$; на $3/5$ интервала – $\mu = 0,96$, $W = 3,1$; на концах интервала – $\mu = 0,93$, $W = 1,7$;

В случае совместной обработки данных трех РЛС с коррелированными ошибками измерений (время корреляции $\tau = 0 - 5$ с) при оптимизации структуры сглаживающего полинома средний выигрыш в точности W составляет: по интервалу – $2,0$; в середине интервала – $2,2$; на $3/5$ интервала – $2,2$; на концах интервала – $1,5$;

В случае коррелированных ошибок измерений при оптимизации структуры сглаживающего полинома средний выигрыш в точности изменяется в зависимости от степени избыточности при совместной обработке данных измерений одной-трех РЛС и одного-трех кинотеодолитов в пределах – 2,14–7,76.

Для увеличения качества сглаживания при коррелированных ошибках измерений длительность интервала сглаживания необходимо выбирать в 1,5 и более раз превышающей время корреляции ошибок измерений при этом зависимость качества сглаживания от отношения длительности интервала сглаживания ко времени корреляции носит в исследуемой области практически линейный характер [85].

Исследование работы разработанных алгоритмов при воздействии аномальных ошибок измерения проводилось на алгоритме адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1.

В результате экспериментального исследования установлено, что разработанный алгоритм сохранил работоспособность при воздействии аномальных ошибок измерений и показал себя устойчивым при обработке данных измерений со сбоями и грубыми ошибками измерений по дальности. С увеличением степени избыточности данных измерений уменьшаются как быстро флуктуирующие, так и медленно флуктуирующие ошибки измерений, а величина ошибок измерений в результате сглаживания уменьшается, по мере увеличения степени избыточности получаемых данных траекторных измерений [83-86].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ существующих алгоритмов обработки данных траекторных измерений, выявлены основные проблемы, обоснована актуальность исследования.

2. Построены и исследованы структуры линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций, позволяющие проводить совместную обработку различных типов измеряемых первичных координат местоположения испытываемых объектов, получаемых от внешнетраекторных измерительных средств, для получения независимых оценок вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

3. Предложен и обоснован способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге сглаживания. Особенностью данного способа является то, что на каждом последующем шаге локально-скользящего сглаживания данных измерений нет необходимости нахождения начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, а используется значение, которое было получено на предыдущем шаге локально-скользящего сглаживания. Применение разработанного способа позволяет уменьшить время на обработку данных траекторных измерений.

4. Разработаны и исследованы методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома: с оптимизацией степени сглаживавшего полинома; с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 и Структура 2.

5. Разработаны и исследованы алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, которые позволяют осуществлять совместную обработку данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью, что позволяет повысить точность

и достоверность определения вторичных параметров положения испытываемых объектов.

6. В результате проведенного экспериментального исследования установлено, что разработанные алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений повышают точность и достоверность определения вторичных координат пространственного положения ЛА в траекторных измерительно-вычислительных комплексах.

7. Установлено, что разработанные алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений сохраняют работоспособность при воздействии аномальных ошибок измерений и обеспечивают устойчивость в работе при обработке данных измерений со сбоями и грубыми ошибками измерений.

8. Получены патенты на изобретение «Устройство для обработки данных результатов измерений», UA № 83522 от 25.07.2008 и декларационный патент на полезную модель «Устройство для обработки данных результатов измерений», UA № 20124 от 15.01.2007.

9. Результаты диссертационного исследования использованы в научно-исследовательских работах: «Разработка методов совместной реализации пространственной и временной избыточности данных траекторного контроля в информационно-измерительных системах» (№ гос. рег. 0113U002755); «Разработка информационной технологии повышения точности определения вторичных параметров положения и движения летательных аппаратов при обработке данных измерений с коррелированными ошибками» (№ гос. рег. 0114U001390).

10. Результаты исследований и разработанное программное обеспечение внедрено в учебный процесс на кафедрах «Радиотехника и защита информации» и «Автоматика и телекоммуникации» факультета «Компьютерных информационных технологий и автоматике» ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» при чтении следующих курсов: «Информационно-измерительные системы и комплексы», «Системный анализ управления и обработки информации».

В целом совокупность полученных в диссертации теоретических и практических результатов позволяет сделать вывод о том, что цель исследований достигнута, сформулированные задачи решены.

Дальнейшим направлением исследований является оценка производных (скоростей и ускорений) сглаженных значений вторичных координат пространственного положения летательного аппарата.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВС	–	вычислительная система
ВТИ	–	внешнетраекторные измерения
ВТИС	–	внешнетраекторные измерительные средства
КЛС	–	кусочно-локальное сглаживание
КТС	–	кинотеодолитная станция
ЛА	–	летательный аппарат
ЛНБФ	–	линейно независимая базисная функция
ЛСС	–	локально-скользящее сглаживание
МДЗ		максимально достоверное значение
ММП	–	метод максимального правдоподобия
МНК	–	метод наименьших квадратов
МПО	–	максимально правдоподобная оценка
ОБФ	–	ортогональная базисная функция
ПК	–	персональный компьютер
РЛС	–	радиолокационная станция
САСПИ	–	средства автоматического съема и передачи информации
СЕВ	–	система единого времени
СКО	–	среднеквадратическая ошибка
СО	–	статистическая оценка
СП	–	сглаживающий полином
ТИВК	–	траекторный измерительно-вычислительный комплекс
ЭВМ	–	электронно-вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огоднийчук, Н. Д. Обработка траекторной информации. Ч. 1 / Н. Д. Огороднийчук. – К. : КВВАИУ, 1981. – 141 с.
2. Жданюк, Б. Ф. Основы статистической обработки траекторной информации / Б. Ф. Жданюк. – М. : Сов. радио, 1978. – 384 с.
3. Огоднийчук, Н. Д. Обработка траекторной информации. Ч. II / Н. Д. Огороднийчук. – Киев : КВВАИУ, 1986. – 224 с.
4. Махонькин, Ю. Е. Автоматизированная обработка результатов измерений при летных испытаниях / Ю. Е. Махонькин, З. А. Павлова, А. И. Фальков, В. И. Корачков. – М. : Машиностроение, 1983. – 112 с.
5. Солдатов, А. С. Концепция создания перспективной информационно-измерительной системы для летных испытаний авиационной техники с применением технологий индустрии 4.0 / А. С. Солдатов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2021. – № 20. – С. 167-177.
6. Агаджанов, П. А. Космические траекторные измерения / П. А. Агаджанов, В. Е. Дулевич, А. А. Коростелев и др. – М. : Сов. радио, 1969. – 504 с.
7. Нетребко, Н.И. Исторический очерк о 7 отделе Государственного авиационного испытательного центра/ Н.И. Нетребко, М.М. Козлов, Л.Е. Козлов – Феодосия.:ГАНИЦ, 2002. – 68 с.
8. Булычев, Ю. Г. Радиотехнические методы определения местоположения и параметров движения объектов: монография / Ю. Г. Булычев, А. В. Елисеев, А. Г. Жуковский, А. А. Манин. – Ростов-на-Дону : Северо-Кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики, 2015. – 266 с.
9. Щербов, И. Л. История развития методов обработки данных внешнетраекторных измерений на авиационных полигонах / И. Л. Щербов, В. В.Паслён, М. В. Михайлов, О. М. Луханина // Вестник Днепропетровского

университета. Серия: Ракетно-космическая техника. Выпуск 10, том 2. – 2006. – № 9/2. – С. 242-245.

10. Щербов, И. Л. Совместная обработка данных траекторных измерений наземных и воздушных измерительных средств / И. Л. Щербов, В. В. Паслен, К. И. Мотылев, М. В. Михайлов // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Горно-геологическая. Выпуск 111. – Донецк : ДонНТУ. 2006. – С. 55–59.

11. Еналеев, С. Ф. Траекторные измерения / С. Ф. Еналеев. – Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 124 с.

12. Тьюки, Дж. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ / Дж. Тьюки. – Пер. с англ. – М. : Сов. Радио, 1981. – 693 с.

13. Хьюбер, Дж. П. Робастность в статистике / Дж. П. Хьюбер. – М. : Мир, 1984. – 304 с.

14. Додонов, А. Г. Радиотехнические средства внешнетраекторных измерений / А. Г. Додонов, В. Г. Путятин // Математические машины и системы. – 2018. – № 1. – С. 3-30.

15. Бабиченко, А. В. Прикладные методы обработки информации и моделирования при проектировании информационно-управляющих комплексов высокоманевренных летательных аппаратов / А. В. Бабиченко // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М. : МГТУ им. Баумана, 2009. – 377 с.

16. Беликов, А. Б. Математическая обработка результатов геодезических измерений / А. Б. Беликов, В. В. Симонян. – М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. – 432 с.

17. Эльясберг, П. Е. Определение движения по результатам измерений / П. Е. Эльясберг. – М. : Либроком, 2019. – 416 с.

18. Паслен, В. В. Моделирование траекторий движения летательных аппаратов / В. В. Паслен, И. П. Мерабишвили // Материалы XXIX военно-научной конференции училища. Вып. 4. – К. : КВВАИУ, 1987. – С. 52–54.

19. Щербов, И. Л. Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функций / И. Л. Щербов, В. В. Паслён // Вестник Академии гражданской защиты. Выпуск 1 (25). – Донецк : АГЗ, 2021. – С. 48-53.

20. Огороднийчук, Н. Д. Статистическая оценка положения объекта по избыточной первичной информации / Н. Д. Огороднийчук. – Ленинград : ЛВИКА, 1966. – 44 с.

21. Калашников, К. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса / К. И. Калашников, Г. Ф. Кыркунова. – М. : Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 184 с.

22. Мирзоев, М. С. Основы математической обработки информации / М. С. Мирзоев. – Москва : Прометей, 2016. – 316 с.

23. Соловьев, Н. А. Цифровая обработка информации в задачах и примерах / Н. А. Соловьев, Н. А. Тишина, Л. А. Юркевская. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. – 123 с.

24. Орлов, А. И. Организационно-экономическое моделирование. В 3 частях. Ч.3. Статистические методы анализа данных / А. И. Орлов. – М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2012. – 624 с.

25. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М. : Мир, 1980. – 610 с.

26. Адгамов, Р. И. Автоматизированные испытания в авиастроении / Р. И. Адгамов, М. М. Берхеев, И. А. Заляев. – М. : Машиностроение, 1989. – 232 с.

27. Огороднийчук, Н. Д. Использование метода наименьших квадратов для оценки положения объекта с траекторией произвольной формы // Эффективность обработки информации в системах траекторных измерений / Н. Д. Огороднийчук. – М. : Министерство обороны СССР, 1968. – С. 91–100.

28. Огороднийчук, Н. Д. О прикладных методах анализа траекторной информации // Сборник материалов НТК, посвященной 25-летию училища. Ч.1 / Н. Д. Огороднийчук. – К. : КВВАИУ, 1977. – С. 65–84.

29. Паслён, В. В. Методика адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений / А. В. Мильштейн,

В. В. Паслён // Сборник научных трудов. Выпуск 33. – Донецк: Донецкий институт железнодорожного транспорта, 2013. – С. 125-130.

30. Щербов, И. Л. Исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома / И. Л. Щербов // Известия ЮФУ. Технические науки. Выпуск 3 (230). – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2023. – С. 134-143.

31. Кушнарев, П. И. Статистические методы контроля точности траекторных измерительных средств / П. И. Кушнарев, Н. Д. Огоднийчук, А. М. Лакеев // Эффективность обработки информации в системах траекторных измерений. – М. : Министерство обороны СССР, 1968. – С. 109 –112.

32. Самойленко, А. П. Информационные технологии статистической обработки данных / А. П. Самойленко, О. А. Усенко. – Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 126 с.

33. Казаков, В. Г. Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных. Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике / В. Г. Казаков, Е. Н. Громова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. – 85 с.

34. Сафин, Р. Г. Основы научных исследований. Организация и планирование эксперимента / Р. Г. Сафин, А. И. Иванов, Н. Ф. Тимербаев. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2013. – 154 с.

35. Галанин, М. П. Методы численного анализа математических моделей / М. П. Галанин, Е. Б. Савенков. – 2-е изд. – М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2018. – 592 с.

36. Кокотушкин, Г. А. Численные методы алгебры и приближения функций / Г. А. Кокотушкин, А. А. Федотов, П. В. Храпов. – М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2011. – 60 с.

37. Мотылев, К. И. Информационные технологии повышения точности определения параметров положения и движения летательных аппаратов /

К. И. Мотылев // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (05.13.06). – Донецк: ДонНТУ, 2012. – 156 с.

38. Паслён, В. В. Метод повышения точности обработки данных траекторных измерений / К. И. Мотылев, В. В. Паслён // Радиолокация и радиосвязь: III всероссийская научно-техническая конф., 26-30 окт. 2009 г.: доклады конф. – М. : ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2009. – С. 712–715.

39. Мотылев, К. И. Влияние аномальных ошибок измерений на обработку избыточной траекторной информации / К. И. Мотылев // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 6 (71). – Дніпропетровськ: Системні технології, 2010. – С. 141-147.

40. Щербов, И. Л. Методы обработки данных измерений, которые владеют пространственной и временной избыточностью / И. Л. Щербов, В. В. Паслён, К. И. Мотылев, М. В. Михайлов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 5 (46). – Дніпропетровськ, 2006. – С.95-100.

41. Щербов, И. Л. Совместная обработка наземной и воздушной информации / И. Л. Щербов, М. В. Михайлов, К. И. Мотылев, В. В. Паслён // Materials of final international scientifically-practical conference “The Science: theory and practice.” Vol 27. Engineering science. – Praha: Publishing House “Education and Science”, s.r.o.; Prague, Czechia – Dnepropetrovsk, Ukraine – Belgorod, Russian, 2005. – С. 6-9.

42. Щербов, И. Л. Последовательная обработка траекторной информации / И. Л. Щербов, М. В. Михайлов, В. В. Паслён // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції “Науковий потенціал світу – 2005”. Том 17. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 37–39.

43. Щербов, И. Л. Причины возникновения сбоев и методы их устранения / И. Л. Щербов, В. В. Паслён, Д. В. Фесенко, М. В. Михайлов // Международная молодежная научно-практическая конференция «Человек и космос». - Днепропетровск: НЦАОМУ, 2006. – С. 120.

44. Щербов, И. Л. Реализация избыточности данных внешнетраекторных измерений / И. Л. Щербов, К. И. Мотылев, М. В. Михайлов // Международная молодежная научно-практическая конференция «Человек и космос». - Днепропетровск: НЦАОМУ, 2006. – С. 123.

45. Кацман, Ю. Я. Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы / Ю. Я. Кацман. – Томск : Томский политехнический университет, 2013. – 131 с.

46. Михин, М. Н. Теория вероятностей / М. Н. Михин, Т. Б. Белова. – Саратов, Москва : Профобразование, Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 94 с.

47. Господариков, А. П. Высшая математика. Том 6. Специальные функции. Основные задачи математической физики. Основы линейного программирования / А. П. Господариков, И. Б. Ерунова, Г. А. Колтон [и др.]; под редакцией А. П. Господариков. – Санкт-Петербург : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – 122 с.

48. Кудинов, И. В. Аналитические методы решения краевых задач математической физики: монография / И. В. Кудинов Э. М., Карташова; под редакцией Э. М. Карташова. – Самара : Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. – 219 с.

49. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 9-е изд. – М. : Лаборатория знаний, 2020. – 637 с.

50. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М. : Наука. глав. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 232 с.

51. Огороднийчук, Н. Д. Статистическая характеристика методов определения структуры сглаживающих полиномов / Н. Д. Огороднийчук, В. М. Лавраков // Системы передачи и обработки сигналов. Вып. 6. – К. : КВВАИУ, 1982. – С. 42–45.

52. Целых, А. Н. Современные методы прикладной информатики в задачах анализа данных / А. Н. Целых, А. А. Целых, Э. М. Котов. – Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – 130 с.

53. Паслён, В.В. Обработка избыточной траекторной информации в измерительно-вычислительных системах/ К.И. Мотылев, М.В. Михайлов, В.В.

Паслён, Научно-технический журнал «Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы» Вып.2 (22). - Херсон:ХНТУ, 2008. – С. 112-115.

54. Медведев, Д. М. Структуры и алгоритмы обработки данных в системах автоматизации и управления / Д. М. Медведев. – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 100 с.

55. Степанова, Е. А. Основы обработки результатов измерений / Е. А. Степанова, Н. А. Скулкина, А. С. Волегов ; под редакцией Е. А. Степанова. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 96 с.

56. Шпаков, П. С. Математическая обработка результатов измерений / П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. – 410 с.

57. Щербов, И. Л. Исследование области определения параметров базисной функции двух аргументов при построении λ -ортогональной базисной функции / И. Л. Щербов // Известия ЮФУ. Технические науки. Выпуск 6 (230). – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2022. – С. 106-116.

58. Щербов, И. Л. О построении ортогональных базисных функций / И. Л. Щербов, В. В. Паслён, М. В. Михайлов, К. И. Мотылев, Д.М. Лебеденко, А. Г. Антикуз // Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, посвященная 1000-летию города Казани. Материалы конференции. Том II. – Казань: Казан. Гос. техн. Ун-та, 2005. – С. 85-89-140.

59. Паслён, В. В. Исследование структур базисных функций / А. В. Мильштейн, К. И. Мотылев, В. В. Паслён // Сборник научных трудов. – Выпуск 29. – Донецк: Донецкий институт железнодорожного транспорта, 2012. – С. 23-30.

60. Михин, М. Н. Линейная алгебра. Ч. 1. Матрицы и определители / М. Н. Михин, С. П. Курдина. – М. : Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 106 с.

61. Валеев, К. Г. Расщепление спектра матриц / К. Г. Валеев. – К. : Вища школа, 1986. – 272 с.
62. Воеводин, В. В. Вычислительные основы линейной алгебры / В. В. Воеводин. – М. : Лань, 2008. – 300 с.
63. Грантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Грантмахер. – М. : Физматлит, 2010. – 560 с.
64. Ланкастер, П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 280 с.
65. Ильин, В. А. Линейная алгебра / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. – М.: Физматлит, 2020. – 280 с.
66. Волков, Е. А. Численные методы / Е. А. Волков. – СПб. : Лань, 2022. – 240 с.
67. Огоднийчук, Н. Д. Исследования на ЭВМ свойств систем ЛНБФ и Л-ОБФ как функции двух аргументов / Н. Д. Огоднийчук, В. В. Паслён, С. В. Велигдан // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К. : КВВАИУ, 1989. – С. 90-93.
68. Огоднийчук, Н. Д. Алгоритм совместной реализации пространственной и временной избыточности данных внешнетраекторных измерений / Н. Д. Огоднийчук, В. В. Паслён // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К. : КВВАИУ, 1989. – С. 85-89.
69. Огороднийчук, Н. Д. Сглаживание данных траекторных измерений полиномом переменного порядка / Н. Д. Огоднийчук // Изв. вузов Радиоэлектроника. – 1982. – 25, №9. – С. 79-81.
70. Огоднийчук, Н. Д. Статистическая характеристика методов определения степени сглаживающих полиномов / Н. Д. Огороднийчук, В. М. Лавраков // Системы передачи и обработки сигналов. Вып. 6. – К. : КВВАИУ, 1982. – С. 37-41.
71. Кашкин, В. Б. Статистическая радиотехника / В. Б. Кашкин, А. А. Баскова, А. С. Пустошилов, Я. И. Сенченко. – Красноярск : СФУ, 2021. – 152 с.

72. Бослаф, С. Статистика для всех / С. Бослаф. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 586 с.
73. Демирчан, К. С. Устойчивый метод ортогонализации векторов для расчета электрических цепей / К. С. Демирчан, Ю. В. Ракитский // Изд. АН СССР. Энергия и транспорт. – 1981. – Вып. № 4. – С. 72-77.
74. Огороднийчук, Н. Д. Оценка параметров движения и точность их определения по данным коррелированных траекторных измерений / Н. Д. Огороднийчук. – К. : КВВАИУ, 1968. – 216 с.
75. Калиткин, Н. Н. Численные методы. Книга 2. Методы математической физики / Н. Н. Калиткин, П. В. Корякин. – М. : Академия, 2013. – 304 с.
76. Антонович, К. М. Использование спутниковых радио-навигационных систем в геодезии. Том 1. / К. М. Антонович. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
77. Кочетков, Е. С. Теория вероятностей и математическая статистика / Е.С. Кочетков, С.О. Смерчинская, В.В. Соколов. – 2-е изд., испр. и перераб. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. – 240 с.
78. Миркин, Б. Г. Введение в анализ данных / Б. Г. Миркин. – М. : Издательство Юрайт, 2019. – 174 с.
79. Щербов, И. Л. К вопросу о реализации взвешенных приближений / И. Л. Щербов, В. В. Паслён, Д. В. Фесенко, М. В. Михайлов // Международная молодежная научно-практическая конференция «Человек и космос». - Днепропетровск: НЦАОМУ, 2006. – С. 121.
80. Паслён, В. В. Построение алгоритма оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений/ А. В. Мильштейн, В. В. Паслён // Научные труды ДонНТУ. Серия: вычислительная техника и автоматизация. Выпуск 22 (200). – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2012. – С. 109-114.
81. Щербов, И. Л. Нелинейное адаптивное сглаживание данных внешнетраекторных измерений / И. Л. Щербов, М. В. Михайлов // Международная

молодежная научно-практическая конференция «Человек и космос». - Днепропетровск: НЦАОМУ, 2006. – С. 122.

82. Щербов, И. Л. Нелинейное адаптивное сглаживание данных внешнетраекторных измерений / И. Л. Щербов, В. В. Паслён, М.В. Михайлов // Университетские микроспутники – перспективы и реальность: междунар. науч.-практ. конф. / НЦАОМ им. А. М. Макарова. – Днепропетровск, 2006. – С. 65.

83. Щербов, И. Л. Информационная технология обработки данных траекторного контроля / И. Л. Щербов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 1. – С.71-77.

84. Щербов, И. Л. Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений / И. Л. Щербов // Известия высших учебных заведений. Электроника. Том 28. Выпуск 3. – Москва, Зеленоград: НИУ «МИЭТ», 2023. – С. 378-384.

85. Щербов, И. Л. Исследование алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений / И. Л. Щербов // Информатика и кибернетика. – 2020. – № 4 (22). – С. 5-12.

86. Щербов, И. Л. Математическое моделирование обработки данных траекторного контроля / И. Л. Щербов // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения национальной безопасности в условиях современности» (17 декабря 2020 г.). – Донецк, 2020. – С. 25–32.

87. Пономарев, В. Б. Математическая обработка результатов инженерного эксперимента / В. Б. Пономарев, А. Б. Лошкарёв ; Мин-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 104 с.

88. Афанасьев, В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / Афанасьев В. Н. – Саратов : Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 310 с.

89. Коломиец, Л. В. Метод наименьших квадратов: метод. указания / Л. В. Коломиец, Н. Ю. Поникарова. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 132 с.

90. Баклицкий, В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В. К. Баклицкий. – М. : ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.

91. Воллернер, Н. Ф. Выбор оптимальной длительности реализации при аппаратурном исследовании случайных процессов / Н. Ф. Воллернер // Изв. вузов. Радиофизика. – 1966. – 9, №4. – С. 737-740.

92. Зализняк, В. Е. Основы научных вычислений. Введение в численные методы для физиков и инженеров / В. Е. Зализняк. – Москва, Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2019. – 264 с.

93. Маглеванный, И. И. Математические основы первичной обработки экспериментальных данных / И. И. Маглеванный, Т. И. Карякина. – Волгоград : Волгоградский государственный социально-педагогический университет, «Перемена», 2015. – 142 с.

94. Буре, В. М. Теория вероятностей и математическая статистика / В. М. Буре, Е. М. Парилина. – СПб. : Лань, 2013. – 416 с.

95. Лисицин, Д. В. Устойчивые методы оценивания параметров статистических моделей / Д. В. Лисицин. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. – 76 с.

96. Горбунов, А. А. Автоматизированные методы обработки результатов эксперимента / А. А. Горбунов, А. Д. Припадчев. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. – 99 с.

97. Авхадиев, Ф. Г. Численные методы анализа /Ф. Г. Авхадиев. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 126 с.

98. Борисова, И. В. Цифровые методы обработки информации / И. В. Борисова. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. – 139 с.

99. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – 406 с.

100. Будникова, И. К. Теория и практика научного эксперимента / И. К. Будникова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – 132 с.

101. Хейфец, М. И. Обработка результатов испытаний: Алгоритмы, номограммы, таблицы / М. И. Хейфец. – М. : Машиностроение, 1988. – 168 с.

102. Люшнин, С. А. Расчёт и анализ траектории движения управляемых летательных аппаратов / С. А. Люшнин, Д. П. Левин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 229 с.

103. Постников, В. М. Основы эксплуатации автоматизированных систем обработки информации и управления / В. М. Постников. – М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2013. – 180 с.

104. Иванов, Н. М. Баллистика и навигация космических аппаратов / Н. М. Иванов, Л. Н. Лысенко. – 3-е изд. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2016. – 528 с.

105. Микрин, Е. А. Ориентация, выведение, сближение и спуск космических аппаратов по измерениям от глобальных спутниковых навигационных систем / Е. А. Микрин, М. В. Михайлов. – 2-е изд. – М. : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2018. – 360 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=25)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
	степени		структуры 1		структуры 2		
	w	μ	w	μ	w	μ	w
1	1,67	0,89	1,69	0,91	1,69	0,91	1,81
2	2,61	0,98	2,62	0,99	2,62	0,99	2,67
3	2,94	0,94	3,03	0,96	3,03	0,96	3,36
4	3,09	0,94	3,23	0,96	3,23	0,96	3,49
5	3,63	0,97	3,75	0,98	3,75	0,98	3,91
6	3,62	0,98	3,67	0,98	3,67	0,98	3,86
7	3,75	0,97	3,80	0,97	3,80	0,97	4,15
8	3,96	0,96	4,03	0,97	4,03	0,97	4,51
9	3,75	0,95	3,88	0,97	3,88	0,96	4,33
10	3,90	0,96	4,05	0,97	4,05	0,97	4,34
11	3,84	0,96	3,95	0,97	3,95	0,97	4,00
12	3,56	0,96	3,62	0,97	3,62	0,97	4,27
13	3,83	0,97	3,87	0,97	3,87	0,97	4,00
14	3,63	0,96	3,67	0,97	3,67	0,97	3,67
15	3,51	0,96	3,59	0,97	3,59	0,97	3,88
16	3,79	0,96	3,95	0,98	3,95	0,98	4,23
17	3,41	0,96	3,57	0,97	3,57	0,97	3,82
18	3,34	0,96	3,47	0,97	3,47	0,97	3,69
19	3,57	0,98	3,64	0,98	3,64	0,98	3,83
20	3,62	0,98	3,65	0,99	3,65	0,99	3,78
21	3,72	0,97	3,79	0,98	3,79	0,98	4,06
22	3,46	0,93	3,59	0,95	3,59	0,94	4,19
23	3,15	0,91	3,24	0,92	3,24	0,92	3,89
24	2,81	0,97	2,81	0,98	2,81	0,97	2,96
25	1,68	0,85	1,80	0,93	1,80	0,93	1,90
По интервалу	3,35	0,95	3,45	0,97	3,44	0,97	3,74
На 3/5 интервала	3,67	0,96	3,76	0,97	3,76	0,97	4,08
На концах интервала	1,68	0,87	1,75	0,92	1,74	0,92	1,86
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							
2. X=0, Y=0, Z=7000; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							

Таблица А.2 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=21)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
	степени		структуры 1		структуры 2		
	w	μ	w	μ	w	μ	
1	1,75	0,93	1,78	0,96	1,74	0,93	1,84
2	2,65	0,95	2,69	0,96	2,69	0,96	2,92
3	2,89	0,92	2,99	0,94	3,03	0,94	3,46
4	3,12	0,96	3,23	0,98	3,23	0,98	3,42
5	3,29	0,98	3,35	0,98	3,34	0,98	3,49
6	3,29	0,96	3,32	0,97	3,34	0,96	3,65
7	3,48	0,94	3,51	0,95	3,60	0,96	4,06
8	3,32	0,94	3,38	0,95	3,49	0,96	3,90
9	3,56	0,95	3,64	0,96	3,72	0,97	4,05
10	3,62	0,97	3,72	0,98	3,75	0,98	3,99
11	3,81	0,97	3,91	0,98	3,88	0,98	4,13
12	3,46	0,97	3,54	0,98	3,50	0,97	3,76
13	3,62	0,96	3,71	0,97	3,67	0,97	4,03
14	3,53	0,95	3,64	0,96	3,62	0,96	4,05
15	3,18	0,94	3,58	0,96	3,28	0,96	3,64
16	3,22	0,96	3,23	0,97	3,28	0,97	3,53
17	3,28	0,98	3,39	0,99	3,32	0,99	3,42
18	3,27	0,97	2,95	0,99	3,35	0,99	3,48
19	2,81	0,94	2,82	0,96	2,91	0,96	3,17
20	2,80	0,97	2,80	0,99	2,83	0,99	2,88
21	1,68	0,86	1,74	0,92	1,76	0,93	1,87
По интервалу	3,13	0,95	3,20	0,97	3,21	0,97	3,46
На 3/5 интервала	3,44	0,96	3,51	0,97	3,52	0,97	3,82
На концах интервала	1,71	0,90	1,76	0,94	1,75	0,93	1,85

Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО_R=40 м, СКО_α=7', СКО_β=7'
2. X=0, Y=0, Z=7000; СКО_R=40 м, СКО_α=7', СКО_β=7'

Таблица А.3 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=17)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
	степени		структуры 1		структуры 2		
	w	μ	w	μ	w	μ	
1	1,54	0,85	1,57	0,89	1,57	0,89	1,69
2	2,37	0,90	2,43	0,91	2,42	0,91	2,80
3	2,56	0,89	2,66	0,91	2,57	0,89	3,13
4	2,76	0,92	2,90	0,95	2,80	0,93	3,18
5	3,04	0,92	3,23	0,95	3,21	0,95	3,61
6	3,29	0,92	3,08	0,95	3,10	0,95	3,43
7	3,00	0,93	3,17	0,96	3,14	0,95	3,31
8	2,84	0,92	2,94	0,95	2,85	0,93	3,30
9	2,88	0,93	2,96	0,95	2,86	0,93	3,28
10	2,94	0,96	2,99	0,97	2,93	0,96	3,17
11	3,30	0,98	3,35	0,99	3,34	0,99	3,46
12	2,87	0,95	2,91	0,96	2,92	0,96	3,15
13	2,89	0,94	2,95	0,95	2,90	0,94	3,25
14	2,63	0,95	2,71	0,97	2,61	0,92	2,87
15	2,40	0,91	2,52	0,95	2,41	0,92	2,74
16	2,23	0,89	2,33	0,93	2,31	0,85	2,58
17	1,63	0,86	1,62	0,87	1,60	0,80	1,76
По интервалу	2,63	0,92	2,73	0,94	2,68	0,93	3,00
На 3/5 интервала	2,91	0,94	3,02	0,96	2,97	0,95	3,29
На концах интервала	1,58	0,86	1,60	0,88	1,58	0,87	1,73
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							
2. X=0, Y=0, Z=7000; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							

Таблица А.4 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=13)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
	степени		структуры 1		структуры 2		
	w	μ	w	μ	w	μ	
1	1,68	0,94	1,71	0,96	1,65	0,89	1,75
2	2,10	0,82	2,22	0,85	2,17	0,84	2,73
3	2,34	0,92	2,37	0,93	2,33	0,91	2,60
4	2,39	0,87	2,51	0,90	2,41	0,88	2,93
5	2,72	0,89	2,88	0,92	2,76	0,90	3,42
6	2,68	0,94	2,66	0,93	2,60	0,92	3,01
7	2,62	0,94	2,63	0,93	2,61	0,93	2,88
8	2,57	0,94	2,72	0,98	2,69	0,97	2,81
9	2,86	0,96	3,00	0,98	2,93	0,97	3,10
10	2,64	0,94	2,61	0,93	2,56	0,92	2,92
11	2,39	0,91	2,45	0,92	2,44	0,92	2,73
12	2,09	0,86	2,17	0,88	2,15	0,88	2,47
13	1,47	0,86	1,45	0,84	1,43	0,81	1,57
По интервалу	2,35	0,91	2,41	0,92	2,36	0,90	2,69
На 3/5 интервала	2,64	0,93	2,72	0,94	2,65	0,93	3,10
На концах интервала	1,57	0,90	1,58	0,90	1,54	0,85	1,66
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							
2. X=0, Y=0, Z=7000; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'							

Таблица А.5 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при $n=9$)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:						ИС
	степени		структуры 1		структуры 2		
	w	μ	w	μ	w	μ	w
1	1,52	0,96	1,60	0,96	1,49	0,90	1,55
2	1,93	0,91	2,15	0,97	2,22	0,99	2,16
3	2,34	0,97	2,46	0,97	2,48	0,98	2,40
4	2,32	0,92	2,44	0,92	2,32	0,93	2,53
5	2,36	0,97	2,49	0,97	2,27	0,94	2,43
6	2,38	0,93	2,51	0,95	2,34	0,91	2,66
7	2,35	0,97	2,37	0,97	2,31	0,93	2,42
8	1,83	0,82	1,92	0,87	1,93	0,87	2,11
9	1,51	0,95	1,56	0,99	1,50	0,92	1,54
По интервалу	2,06	0,93	2,17	0,97	2,09	0,94	2,21
На 3/5 интервала	2,35	0,95	2,45	0,97	2,34	0,94	2,50
На концах интервала	1,52	0,96	1,58	0,98	1,49	0,91	1,54
Координаты станций: 1. $X=0, Y=0, Z=0$; $CKO_R=40$ м, $CKO_\alpha=7'$, $CKO_\beta=7'$ 2. $X=0, Y=0, Z=7000$; $CKO_R=40$ м, $CKO_\alpha=7'$, $CKO_\beta=7'$							

Таблица А.6 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=25)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:				ИС
	степени		структуры 1		
	w	μ	w	μ	w
1	1,68	0,91	1,72	0,93	1,81
2	2,59	0,98	2,58	0,98	2,68
3	2,96	0,94	3,00	0,95	3,39
4	3,11	0,95	3,16	0,96	3,50
5	3,65	0,98	3,69	0,98	3,90
6	3,64	0,98	3,69	0,98	3,86
7	3,74	0,97	3,86	0,98	4,12
8	3,90	0,96	4,09	0,97	4,46
9	3,69	0,95	3,91	0,97	4,28
10	3,79	0,95	4,01	0,97	4,42
11	3,68	0,95	3,84	0,97	4,26
12	3,42	0,95	3,52	0,96	3,92
13	3,71	0,96	3,78	0,97	4,20
14	3,53	0,96	3,58	0,97	3,92
15	3,46	0,96	3,52	0,97	3,82
16	3,78	0,97	3,88	0,98	4,18
17	3,42	0,96	3,53	0,97	3,79
18	3,36	0,96	3,46	0,97	3,69
19	3,55	0,97	3,64	0,98	3,85
20	3,52	0,97	3,61	0,98	3,80
21	3,69	0,97	3,77	0,97	4,08
22	3,56	0,94	3,25	0,95	4,14
23	3,22	0,93	3,15	0,94	3,72
24	2,73	0,98	2,74	0,98	2,83
25	1,73	0,91	1,78	0,94	1,86
По интервалу	3,32	0,96	3,41	0,97	3,70
На 3/5 интервала	3,61	0,96	3,73	0,97	4,04
На концах интервала	1,70	0,91	1,75	0,94	1,84
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					
2. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					

Таблица А.7 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=21)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:				ИС
	степени		структуры 1		
	w	μ	w	μ	w
1	1,67	0,91	1,74	0,97	1,79
2	2,62	0,95	2,67	0,96	2,86
3	2,81	0,93	2,96	0,94	3,37
4	3,02	0,96	3,17	0,98	3,33
5	3,20	0,98	3,25	0,98	3,39
6	3,23	0,96	3,23	0,96	3,55
7	3,45	0,95	3,47	0,95	3,92
8	3,28	0,94	3,37	0,96	3,78
9	3,50	0,96	3,62	0,97	3,94
10	3,58	0,97	3,67	0,98	3,91
11	3,77	0,97	3,84	0,98	4,05
12	3,42	0,97	3,48	0,97	3,73
13	3,57	0,96	3,65	0,97	4,01
14	3,53	0,95	3,65	0,96	4,07
15	3,20	0,95	3,33	0,97	3,63
16	3,24	0,97	3,36	0,98	3,48
17	3,29	0,98	3,39	0,99	3,39
18	3,18	0,96	3,33	0,98	3,46
19	2,62	0,92	2,77	0,95	3,07
20	2,65	0,98	2,69	0,99	2,78
21	1,63	0,85	1,68	0,89	1,83
По интервалу	3,07	0,95	3,16	0,97	3,40
На 3/5 интервала	3,40	0,96	3,48	0,97	3,76
На концах интервала	1,65	0,88	1,71	0,93	1,81
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					
2. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					

Таблица А.8 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=17)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:				ИС
	степени		структуры 1		
	w	μ	w	μ	w
1	1,51	0,86	1,52	0,87	1,65
2	2,40	0,91	2,46	0,93	2,77
3	2,64	0,91	2,68	0,92	3,16
4	2,75	0,92	2,87	0,94	3,20
5	2,97	0,92	3,18	0,95	3,61
6	2,83	0,91	3,07	0,95	3,40
7	3,04	0,94	3,19	0,96	3,48
8	2,87	0,94	2,92	0,95	3,28
9	2,84	0,93	2,86	0,94	3,26
10	2,80	0,94	2,81	0,95	3,16
11	3,10	0,95	3,17	0,97	3,42
12	2,81	0,95	2,94	0,97	3,13
13	2,90	0,95	3,02	0,97	3,22
14	2,57	0,95	2,63	0,96	2,82
15	2,30	0,90	2,34	0,91	2,69
16	2,15	0,89	2,21	0,91	2,50
17	1,57	0,87	1,55	0,84	1,71
По интервалу	2,73	0,92	2,67	0,93	2,97
На 3/5 интервала	3,02	0,94	2,97	0,96	3,27
На концах интервала	1,60	0,87	1,53	0,86	1,68
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					
2. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					

Таблица А.9 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при n=13)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:				ИС
	степени		структуры 1		
	w	μ	w	μ	w
1	1,66	0,94	1,69	0,96	1,73
2	2,07	0,80	2,16	0,83	2,71
3	2,29	0,94	2,35	0,96	2,50
4	2,32	0,88	2,37	0,90	2,80
5	2,63	0,89	2,67	0,90	3,30
6	2,66	0,94	2,63	0,94	2,99
7	2,64	0,94	2,70	0,96	2,93
8	2,55	0,93	2,68	0,96	2,90
9	2,73	0,93	2,75	0,93	3,14
10	2,52	0,93	2,42	0,91	2,84
11	2,35	0,93	2,36	0,93	2,64
12	1,97	0,84	2,05	0,87	2,39
13	1,47	0,92	1,46	0,90	1,53
По интервалу	2,30	0,91	2,33	0,92	2,65
На 3/5 интервала	2,58	0,92	2,60	0,93	2,98
На концах интервала	1,57	0,93	1,57	0,92	1,63
Координаты станций: 1. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					
2. X=0, Y=0, Z=0; СКО _R =40 м, СКО _α =7', СКО _β =7'					

Таблица А.10 - Сравнительная оценка качества и эффективности разработанных алгоритмов (при $n=9$)

Номер точки на интервале сглаживания	Показатели качества и эффективности при оптимизации:				ИС
	степени		структуры 1		
	w	μ	w	μ	w
1	1,48	0,98	1,55	0,99	1,55
2	1,92	0,90	2,09	0,99	2,14
3	2,27	0,95	2,52	0,98	2,41
4	2,34	0,96	2,50	0,99	2,50
5	2,29	0,97	2,32	0,98	2,39
6	2,28	0,91	2,41	0,94	2,62
7	2,20	0,92	2,32	0,94	2,44
8	1,77	0,83	2,00	0,94	2,10
9	1,44	0,92	1,46	0,93	1,52
По интервалу	2,00	0,92	2,13	0,98	2,18
На 3/5 интервала	2,28	0,94	2,41	0,99	2,46
На концах интервала	1,46	0,95	1,51	0,97	1,51
Координаты станций: 1. $X=0, Y=0, Z=0$; $СКО_R=40$ м, $СКО_\alpha=7'$, $СКО_\beta=7'$ 2. $X=0, Y=0, Z=0$; $СКО_R=40$ м, $СКО_\alpha=7'$, $СКО_\beta=7'$					

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Графические результаты обработки данных

На рисунках Б.1 – Б.3 представлены графики зависимостей (от времени) разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания (без сбоя и со сбоем) для первого варианта обработки (данные получены от одной РЛС) при числе точек на интервале сглаживания $n = 9$.

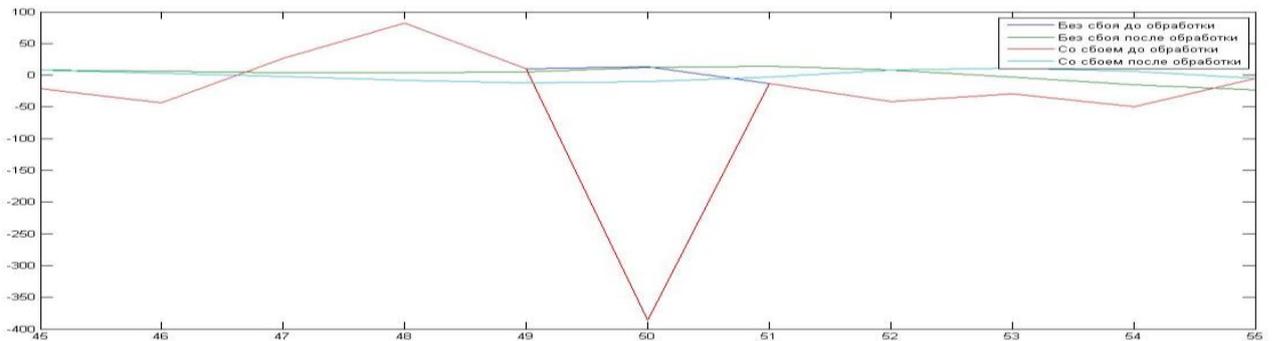


Рисунок Б.1 – Зависимость разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

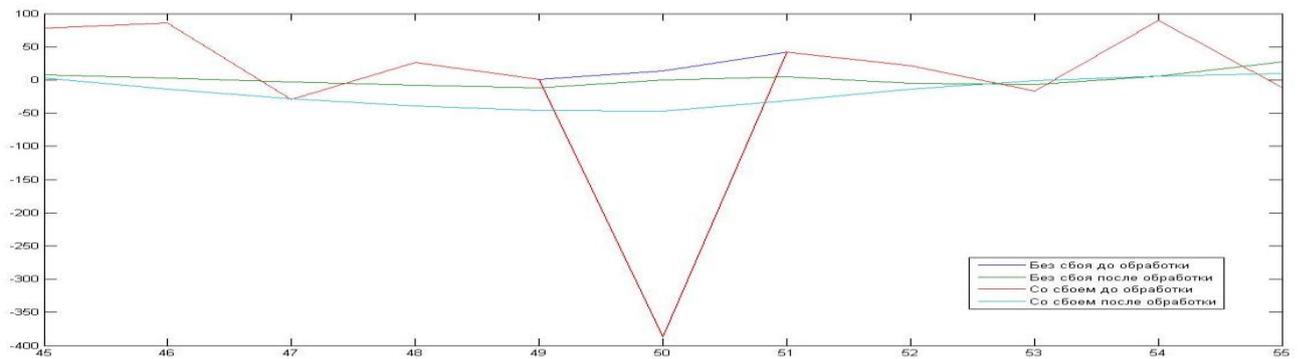


Рисунок Б.2 – Зависимость разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

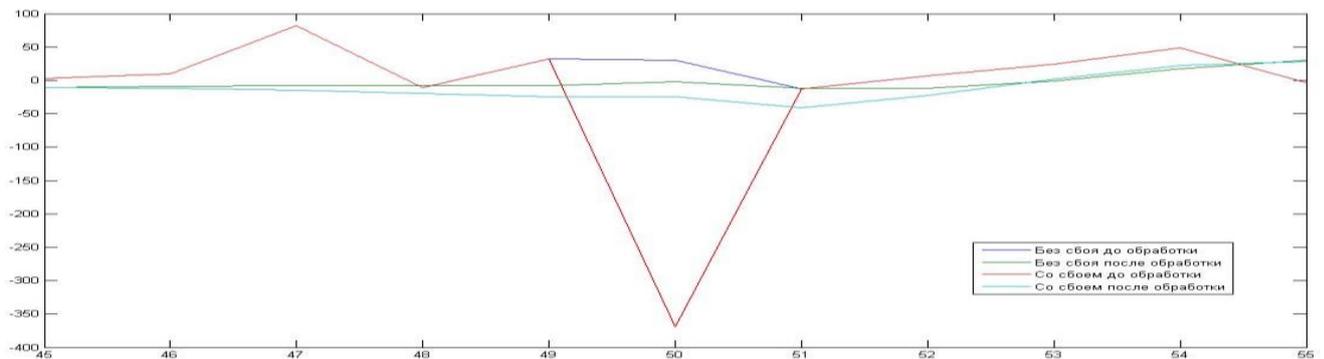


Рисунок Б.3 – Зависимость разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

На рисунке Б.4 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоя и со сбоями по дальности для сбоя, представленных соответственно на рисунках Б.1 – Б.3).

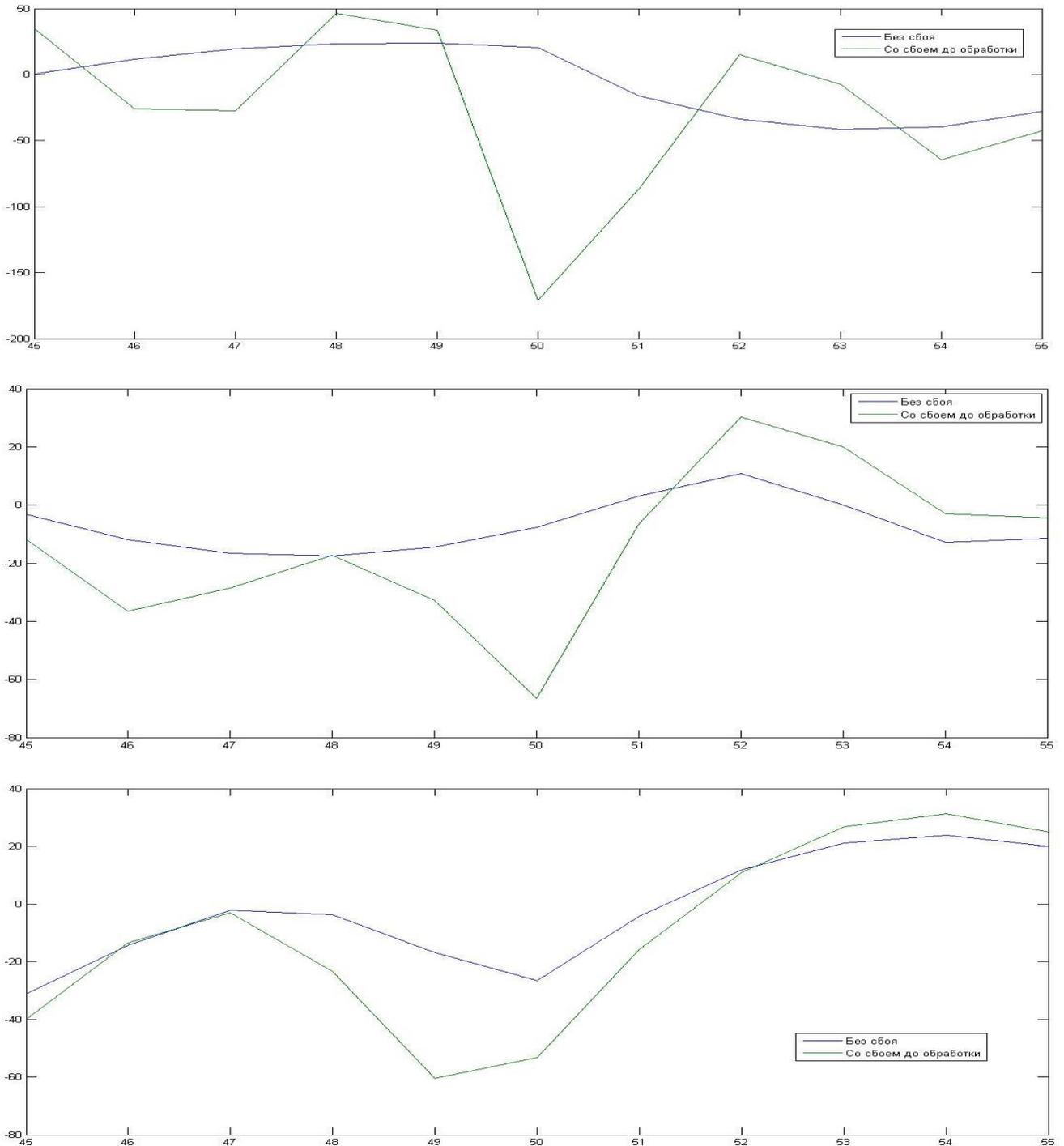


Рисунок Б.4 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунке Б.5 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $Y(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.1 – Б.3).

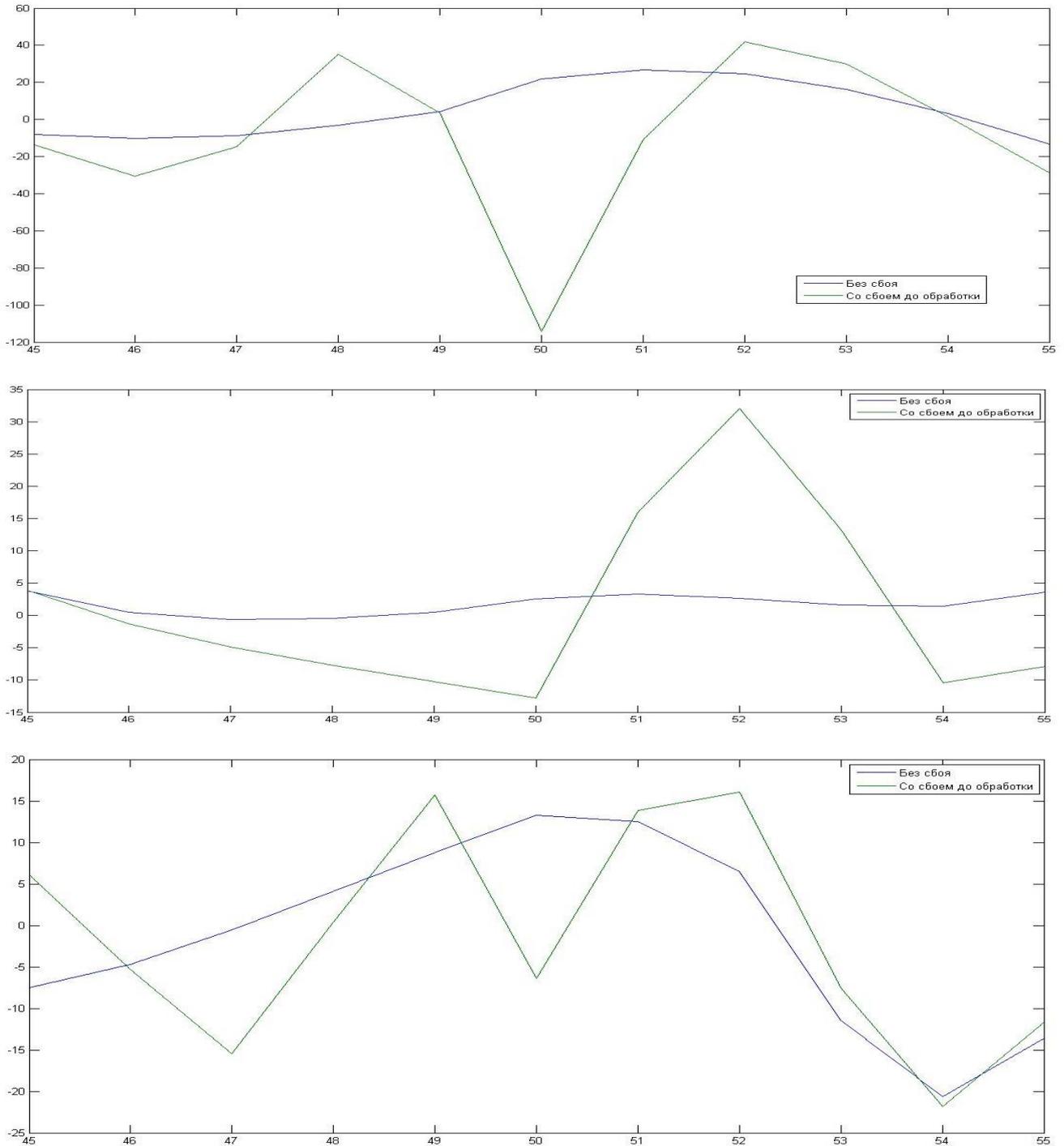


Рисунок Б.5 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $Y(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунке Б.6 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.1 – Б.3).

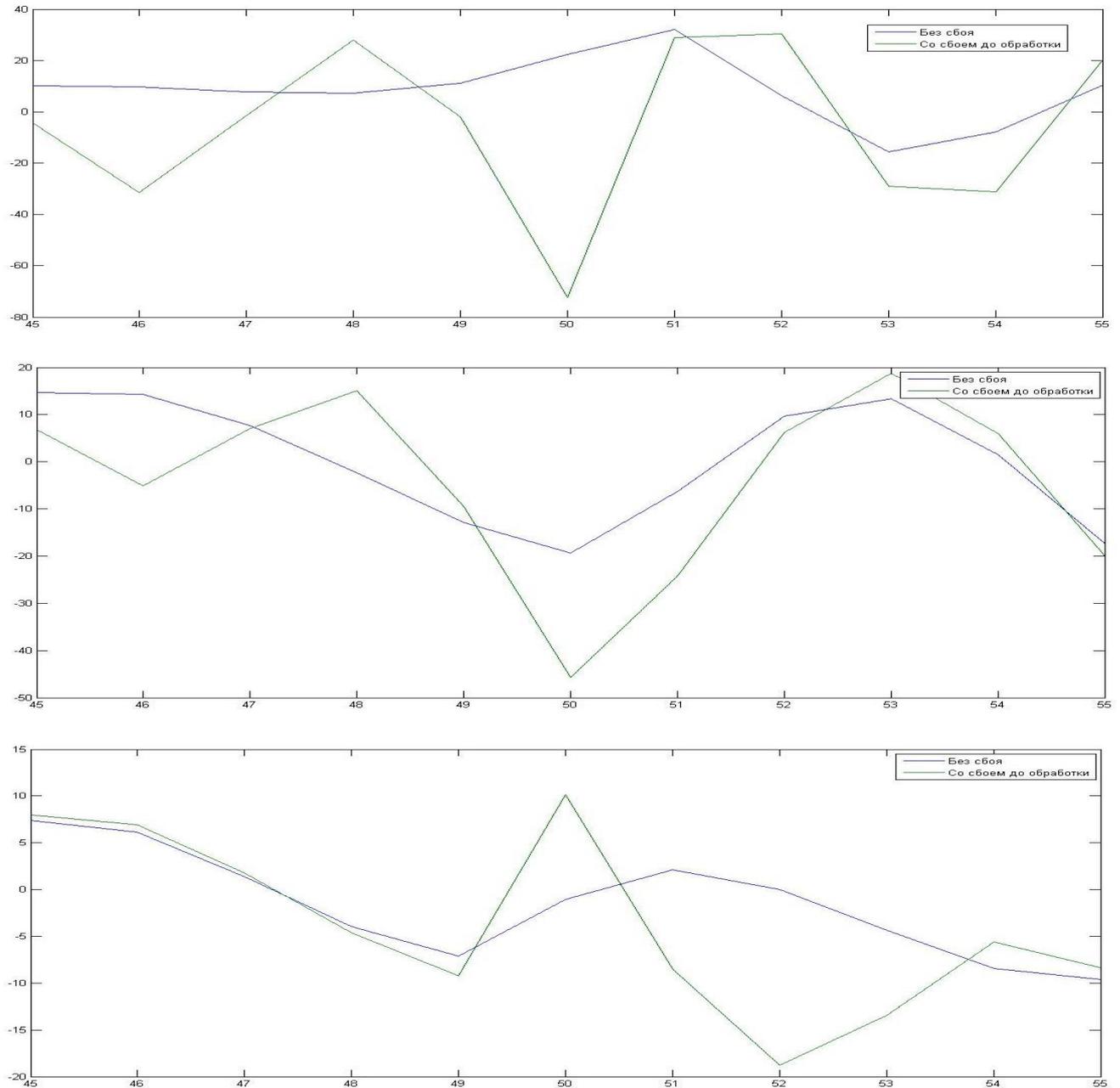


Рисунок Б.6 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунках Б.7 – Б.9 представлены графики зависимостей (от времени) разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания (без сбоя и со сбоем) для второго варианта обработки (данные получены от двух РЛС) при числе точек на интервале сглаживания $n = 9$.

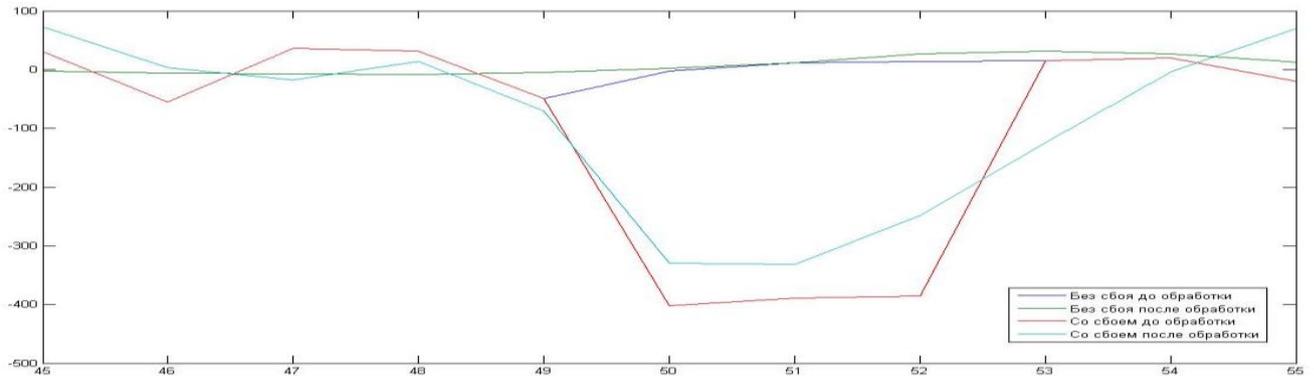


Рисунок Б.7 – График зависимостей разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

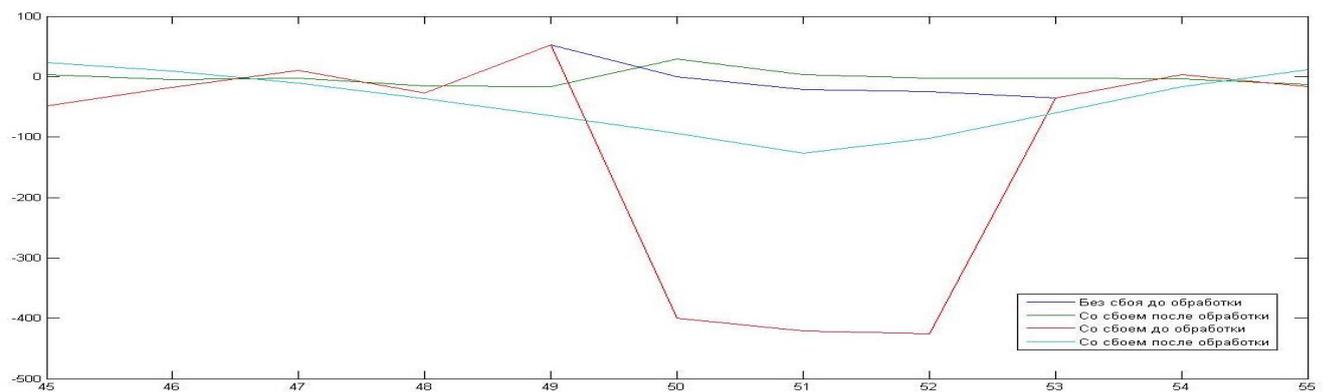


Рисунок Б.8 – График зависимостей разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

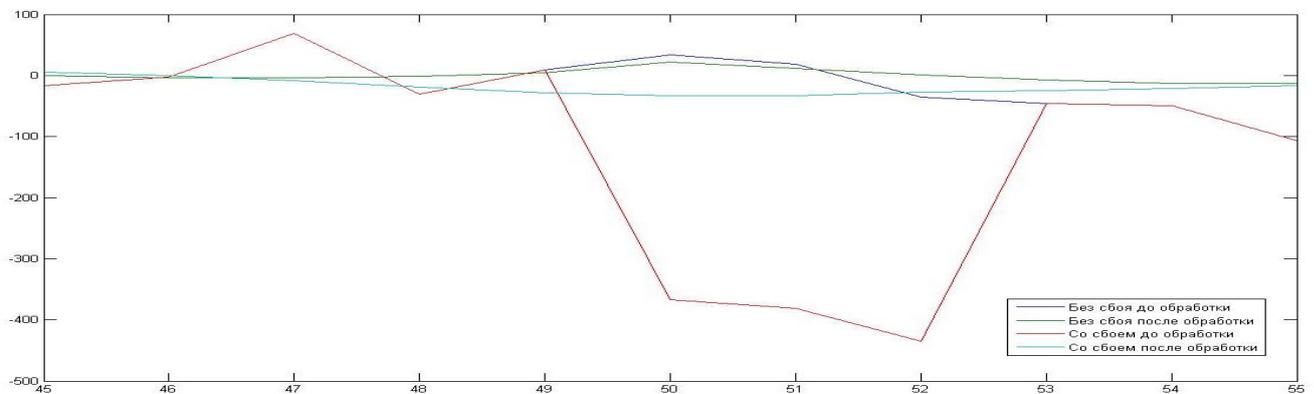


Рисунок Б.9 – График зависимостей разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

На рисунке Б.10 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.7 – Б.9).

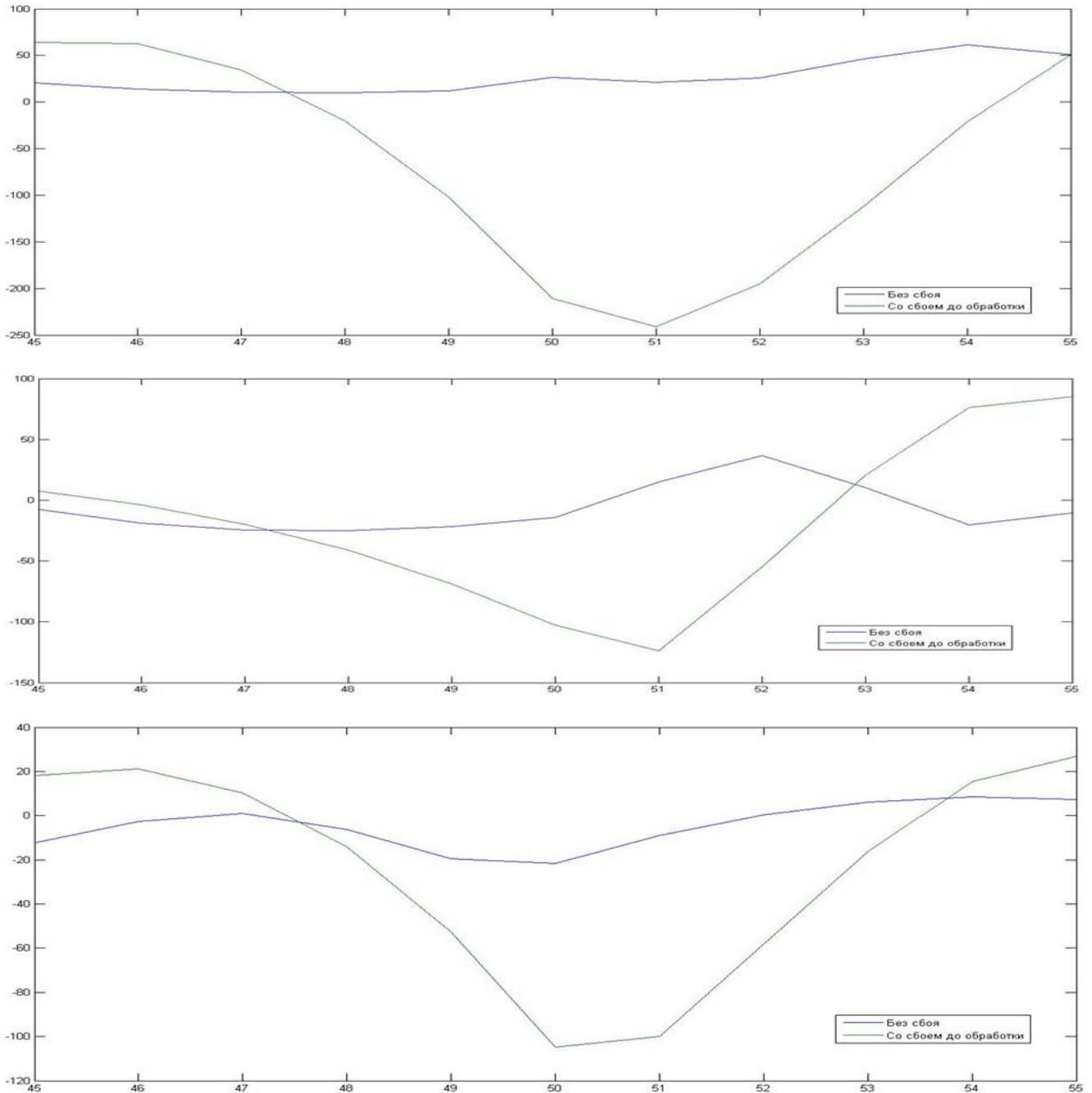


Рисунок Б.10 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунке Б.11 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $Y(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.7 – Б.9).

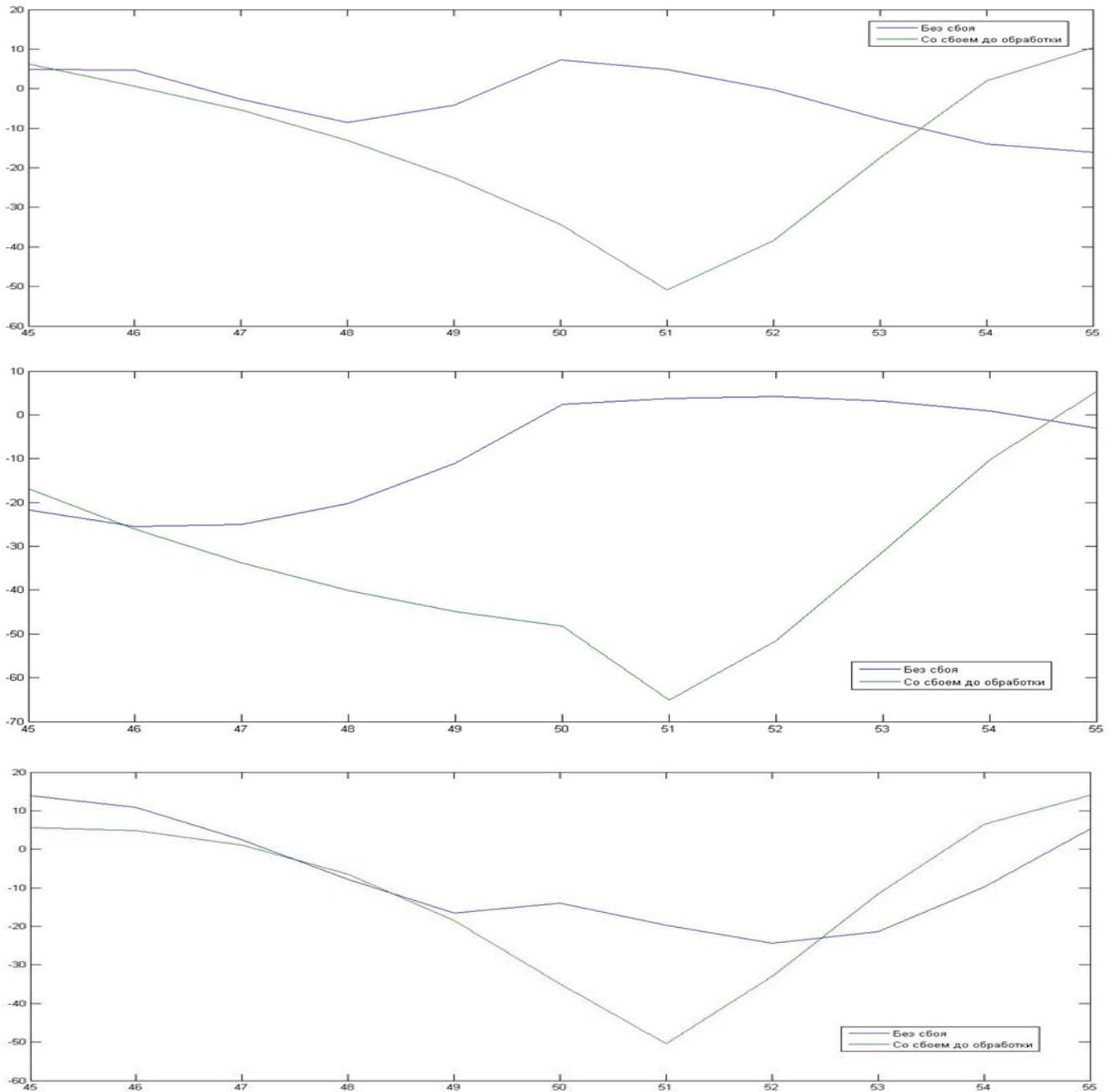


Рисунок Б.11 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $Y(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунке Б.12 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунке Б.7 – Б.9).

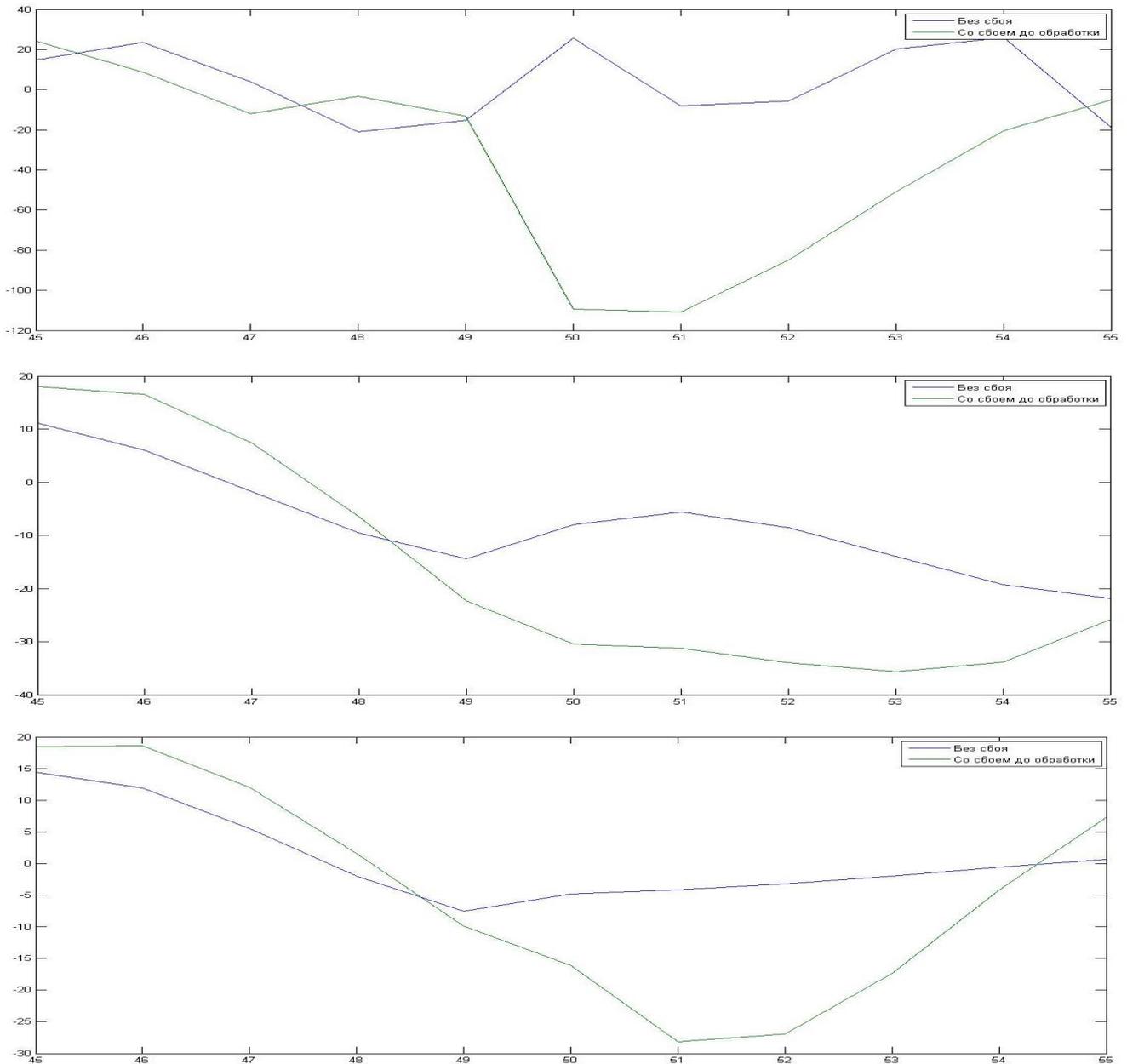


Рисунок Б.12 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунках Б.13 – Б.15 представлены графики зависимостей (от времени) разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания (без сбоев и со сбоем) для третьего варианта обработки (данные получены от трех РЛС) при числе точек на интервале сглаживания $n = 9$.

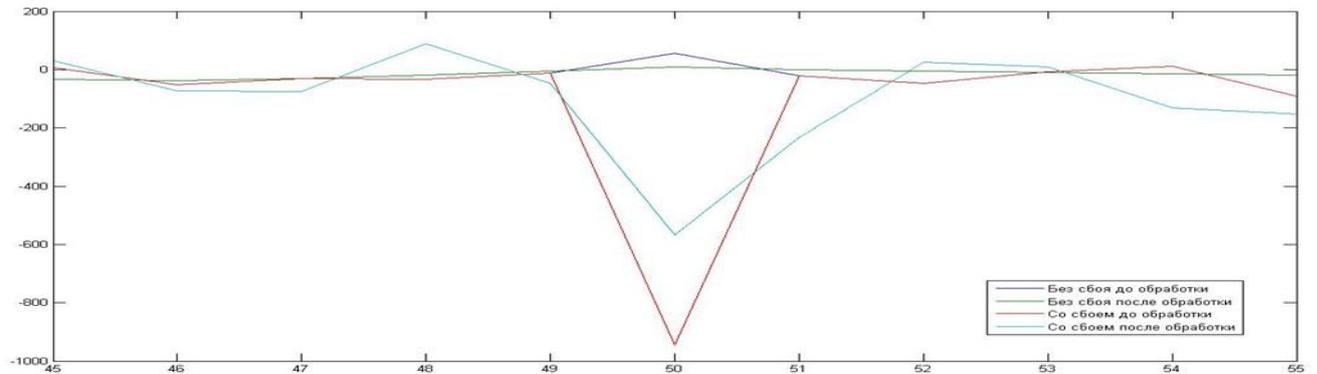


Рисунок Б.13 – График зависимостей разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

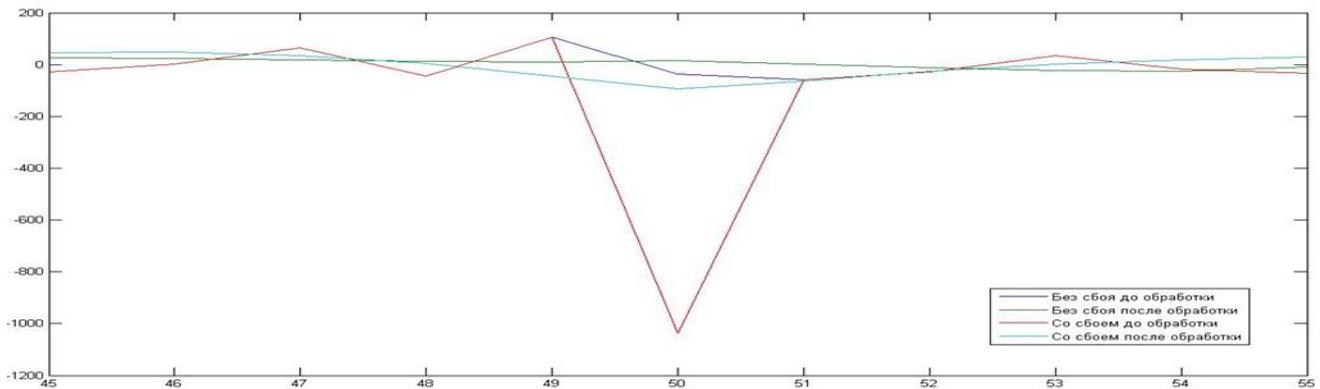


Рисунок Б.14 – График зависимостей разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

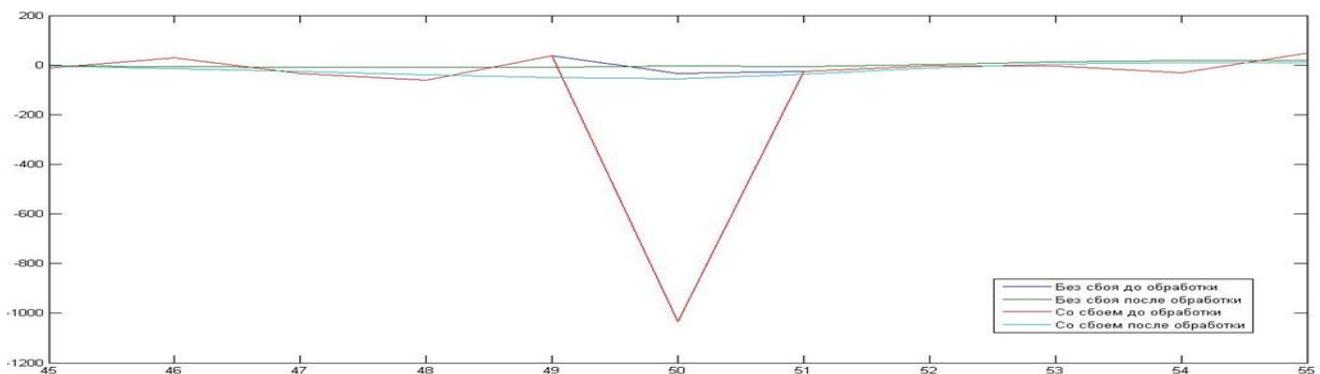


Рисунок Б.15 – График зависимостей разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания

На рисунке Б.16 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.13 – Б.15).

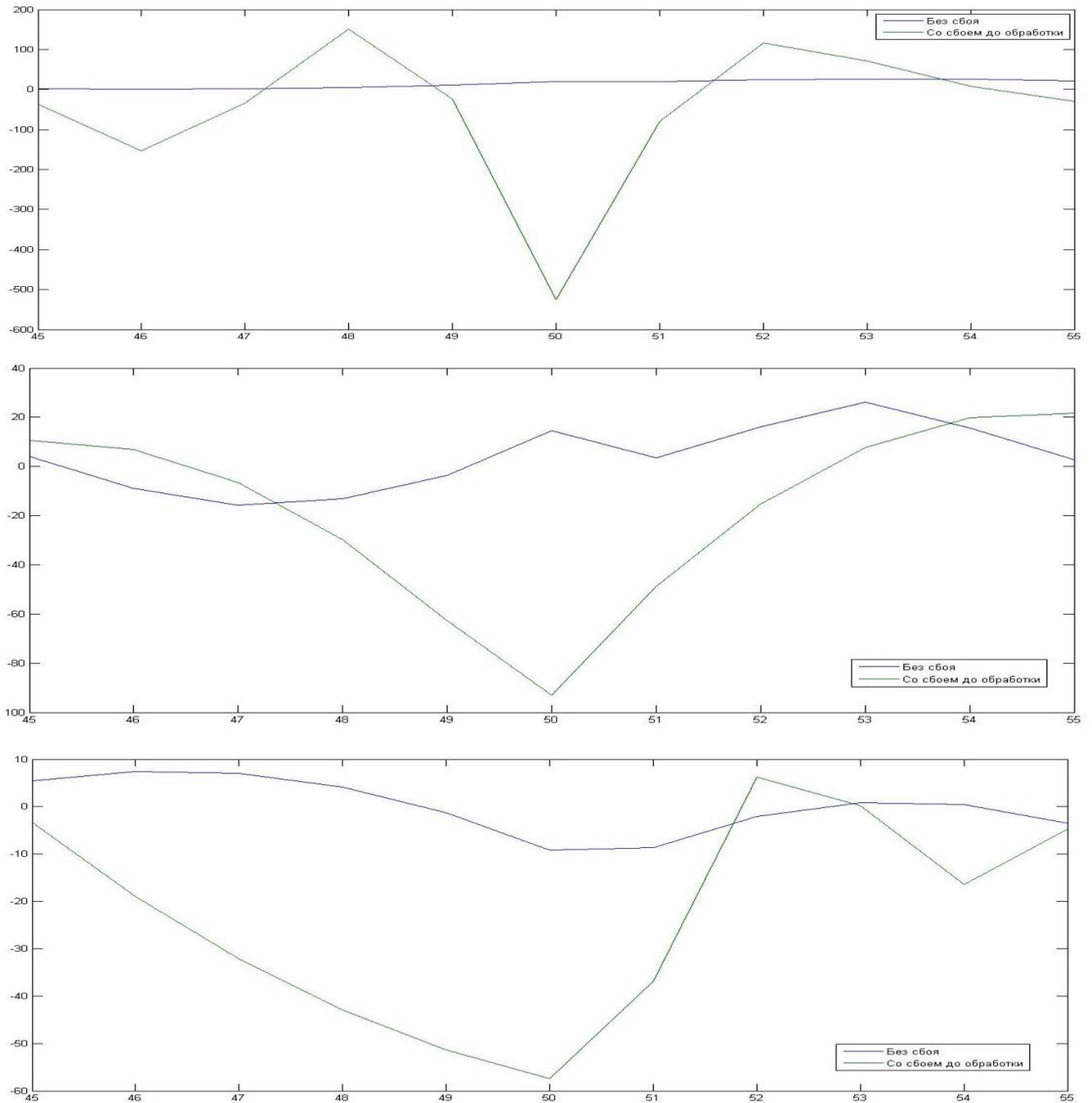


Рисунок Б.16 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунке Б.17 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $Y(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.13 – Б.15).

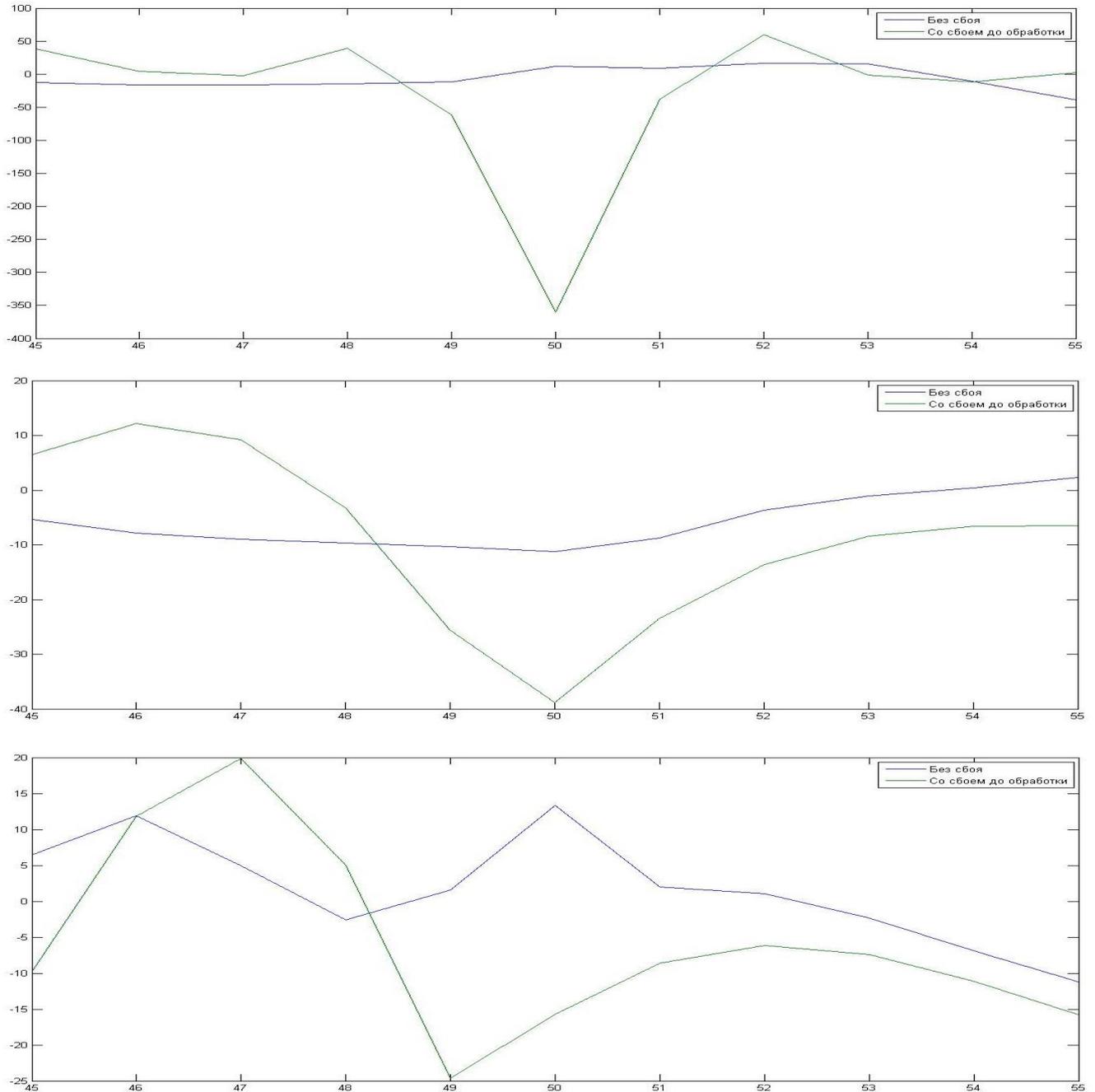


Рисунок Б.17 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $Y(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

На рисунке Б.18 представлены графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоев и со сбоями по дальности для сбоев, представленных соответственно на рисунках Б.13 – Б.15).

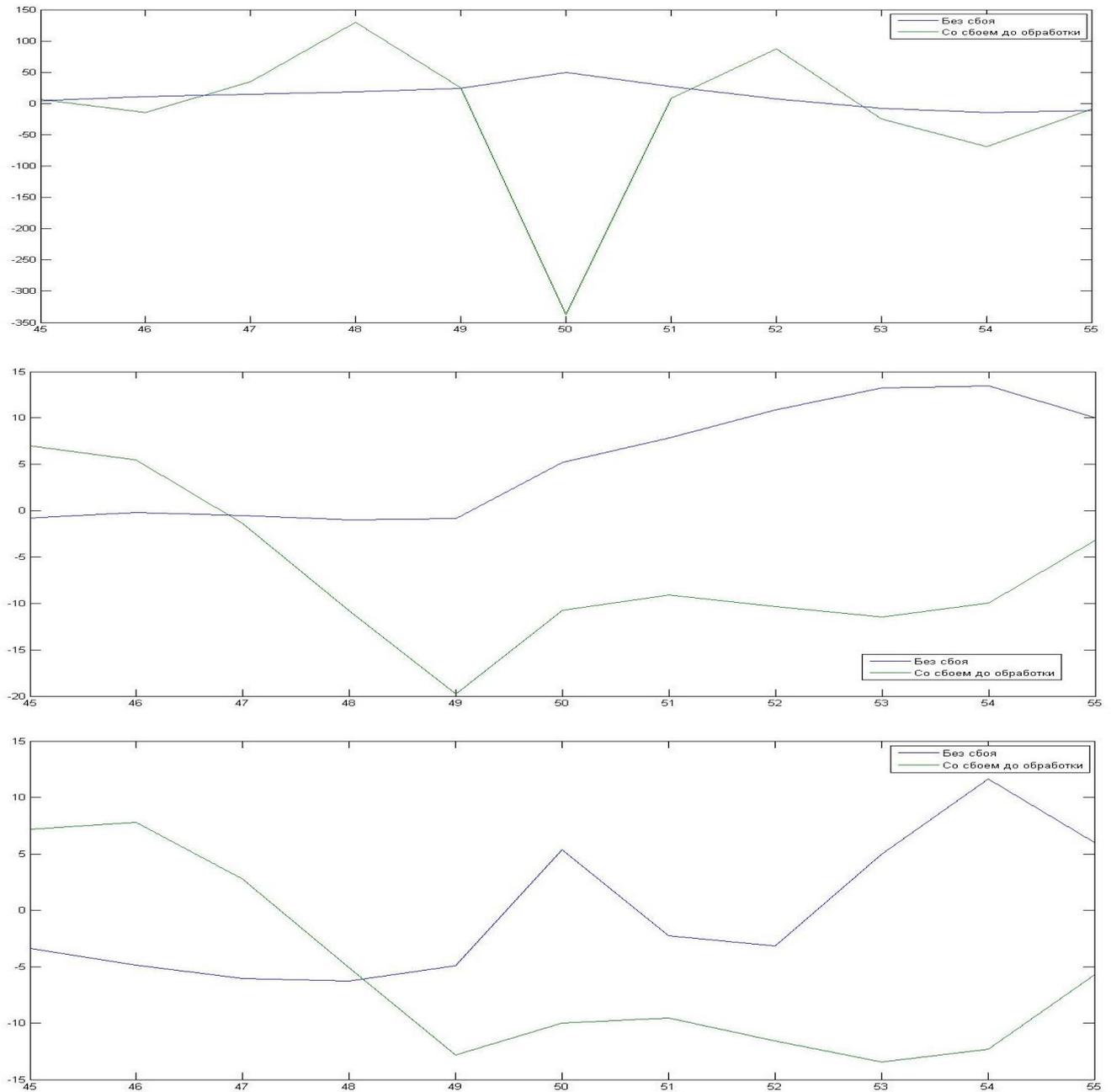


Рисунок Б.18 – Графики зависимостей разности между сглаженными значениями вторичных координат $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Копии документов,
подтверждающих внедрение результатов диссертации



АКТ

об использовании
 результатов диссертационной работы в научных исследованиях
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
 образования «Донецкий национальный технический университет» результатов кандидатской
 диссертации на тему:
 «Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических
 измерений»

автор: Щербов Игорь Леонидович
 научный руководитель: к.т.н., доцент Паслён Владимир Владимирович

Результаты диссертационного исследования Щербова И.Л. использованы в научно-исследовательских работах:

1. «Разработка методов совместной реализации пространственной и временной избыточности данных траекторного контроля в информационно-измерительных системах» (№ гос. рег. 0113U002755).

2. «Разработка информационной технологии повышения точности определения вторичных параметров положения и движения летательных аппаратов при обработке данных измерений с коррелированными ошибками» (№ гос. рег. 0114U001390).

В научно-исследовательских отчетах нашли отражения следующие результаты:

1. Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений.

2. Способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, для начала итерационного процесса нахождения максимально правдоподобной оценки вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

3. Структуры и параметры системы линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций.

4. Показатели эффективности и качества сглаживания для оценки работы разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений.

Проректор по научной работе
 ФГБОУ ВО «ДонНТУ»

С.В. Борщевский

Начальник научно-исследовательской части
 ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
 д.т.н., профессор

К.Н. Лабинский



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО "ДонНТУ"

А.Я. Аноприенко

2023 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Донецкий национальный технический университет» результатов
кандидатской диссертации на тему:
«Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических
измерений»

автор: Щербов Игорь Леонидович

научный руководитель: к.т.н., доцент Паслён Владимир Владимирович

Настоящий акт подтверждает то, что в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донецкий национальный технический университет» внедрены следующие результаты кандидатской диссертации Щербова И.Л.:

1. Программное обеспечение по расчету параметров положения объекта.
2. Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений.
3. Показатели эффективности и качества сглаживания для оценки работы алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных.

Указанные результаты используются на кафедрах «Радиотехника и защита информации» и «Автоматика и телекоммуникации» факультета «Компьютерных информационных технологий и автоматике» при чтении следующих курсов: «Информационно-измерительные системы и комплексы», «Системный анализ управления и обработки информации».

Внедрение в учебный процесс ряда теоретических и практических результатов диссертационной работы Щербова И.Л. позволило повысить качество подготовки бакалавров и магистров по соответствующим направлениям.

Декан факультета компьютерных
информационных технологий и автоматике

В.В. Турупалов

Начальник учебного отдела

Б.В. Гавриленко

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Копии патентов



УКРАЇНА

(19) UA (11) 83522 (13) C2
(51) МПК (2006)
G01D 1/00
G01D 3/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1

(21) а200607350
(22) 03.07.2006
(46) 25.07.2008, Бюл. № 14, 2008 р.
(72) МОТИЛЬОВ КОСТЯНТИН ІГОРОВИЧ, UA,
МИХАЙЛОВ МАКСИМ ВОЛОДИМИРОВИЧ, UA,
ЩЕРБОВ ІГОР ЛЕОНІДОВИЧ, UA, ПАСЬОН ВО-
ЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ, UA
(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ, UA
(56) RU 2003137663 A, 10.06.2005
SU 1550628 A1, 15.03.1990
GB 2124794 A, 22.02.1984
JP 10178660, 30.06.1998
Грачев В.В., Кейн В.М. Радиотехническое сред-
ства управления воздушным движением. -
М.: Транспорт, 1975. - С. 259, 344.
(57) 1. Пристрій для обробки даних результатів
вимірювань, що містить обчислювальний блок,
з'єднаний з блоком пам'яті, який виконаний з мож-
ливістю занесення в пам'ять результатів вимірю-
вань і обчислень, який відрізняється тим, що в
нього додатково введені блок формування такто-
вих імпульсів, з'єднаний з обчислювальним бло-
ком та виконаний з можливістю керування обчис-
лювальним блоком і блоком пам'яті за допомогою
подачі певних послідовностей імпульсів, і генера-
тор тактових імпульсів, з'єднаний з блоком форму-

2

вання тактових імпульсів і виконаний з можливістю
подачі тактових імпульсів на блок формування
тактових імпульсів для функціонування останньо-
го, а обчислювальний блок виконаний з можливі-
стю реалізації узагальненого методу обробки даних
результатів вимірювань, що реалізує просторову
надмірність.
2. Пристрій за п. 1, який відрізняється тим, що
обчислювальний блок виконаний з можливістю
обробки даних результатів вимірювань, отриманих
одночасно щонайменше від двох вимірювальних
станцій, і обробки даних результатів вимірювань з
тою ж точністю, що й при обробці інформації від
однієї вимірювальної станції.
3. Пристрій за п. 1 або 2, який відрізняється тим,
що обчислювальний блок виконаний з можливістю
урахування нерівноточності вимірювальних засо-
бів, дані результатів вимірювань яких надходять
на вхід обчислювального блока.
4. Пристрій за п. 3, який відрізняється тим, що
обчислювальний блок виконаний з можливістю
зменшення впливу на результат збійних значень
параметрів.
5. Пристрій за будь-яким з попередніх пунктів, який
відрізняється тим, що він виконаний у вигляді
мікросхеми на одній підкладці.

Винахід відноситься до області спеціалізова-
них засобів обчислювальної техніки паралельно-
конверсного типу і може бути використаний в сис-
темах автоматизованої обробки даних вимірів,
інформаційно-вимірювальних системах та інфор-
маційно-обчислювальних комплексах.

Відомий пристрій для збору та обробки інфор-
мації в автоматизованих системах керування пові-
тряним рухом [Грачев В. В., Кейн В. М. Радиотех-
ническое средства управления воздушным
движением. М., «Транспорт», 1975г., с. 259, 344с.].
Пристрій складається з трьох основних частин:
датчики інформації, пристрій обробки інформації
та пристрій відображення інформації. Даний при-
стрій застосовується в автоматизованих системах

керування повітряним рухом для обробки та по-
дання в заданій формі траєкторної інформації. Але
він має недоліки, головним з яких є неможливість
урахування надмірної первинної інформації траек-
торних вимірювальних засобів з метою підвищен-
ня точності визначення вторинних координат по-
ложення об'єктів.

Найбільш близьким аналогом пристрою, що
заявляється, є пристрій обробки даних результатів
вимірів [RU 2003 137 663 A МПК 7 G01D1/00,
опубл. 10.06.2005г.]. Пристрій містить обчислю-
вальний блок, блок пам'яті і блок інтерфейсу, причо-
му блок пам'яті має 5 областей пам'яті, що слу-
жать для запису різних даних у відповідні області
пам'яті. Однак даний пристрій має недолік: він не

(13) C2

(11) 83522

(19) UA

забезпечує високу точність і вірогідність результатів через неможливість урахування надмірної первинної траєкторної інформації.

В основу винаходу покладена задача підвищення точності та вірогідності визначення вторинних координат положення й руху космічних та повітряних літальних апаратів за рахунок обробки просторово надмірного набору первинної траєкторної інформації.

Основні ознаки пристрою, що заявляється, співпадають з ознаками найближчого аналога: обчислювальний блок і блок пам'яті, виконаний з можливістю занесення пам'яті результатів вимірів та обчислень.

Поставлена задача вирішується таким чином, що пристрій для обробки даних результатів вимірів, який характеризується тим, що він містить обчислювальний блок і блок пам'яті, виконаний з можливістю занесення в комірки пам'яті результатів вимірів і обчислень, який згідно винаходу додатково містить блок формування тактових імпульсів, виконаний з можливістю керування обчислювальним блоком і блоком пам'яті за допомогою подачі певних послідовностей імпульсів, і генератор тактових імпульсів, виконаний з можливістю подачі тактових імпульсів на блок формування тактових імпульсів для забезпечення можливості останнього виконувати свої функції, а обчислювальний блок виконаний з можливістю реалізації узагальненого методу обробки даних результатів вимірів, що реалізує просторову надмірність.

Доцільно, але не обов'язково виконувати обчислювальний блок з можливістю обробки даних результатів вимірів, отриманих одночасно не менш чим від двох вимірювальних станцій, при цьому він забезпечує точність простих методів обробки даних результатів вимірів при обробці інформації від однієї вимірювальної станції, окрім того, обчислювальний блок виконаний з можливістю урахування нерівноточності вимірювальних засобів, дані результатів вимірів яких надходять на вхід обчислювального блоку, при цьому обчислювальний блок виконаний з можливістю зменшення впливу на результат збійних значень параметрів. Також доцільно виконувати пристрій у виді мікросхеми на одній підкладці.

Причинно-наслідковий зв'язок ознак, що визначають суть винаходу з технічним результатом. На вхід пристрою подаються первинні координати з трьох різних вимірювальних станцій. На виході пристрою маємо результат обробки трьох наборів координат - уточнені вторинні координати об'єкта, що спостерігається. У той же час, при подачі на вхід первинної інформації мінімально-необхідного обсягу (з однієї станції), на виході одержуємо вторинні координати з точністю обробки вже відомих пристроїв. Блок формування тактових імпульсів керує обробкою інформації в обчислювальному блоці за допомогою подачі певних тактових сигналів від генератора тактових імпульсів. Конструкція передбачає виконання пристрою у виді мікросхеми.

Зазначені ознаки визначають сутність винаходу, наведеного на фігурі, якій представлена струк-

турна схема пристрою обробки даних результатів вимірів, де обчислювальний блок - 1, блок пам'яті - 2, блок формування тактових імпульсів - 3, генератор тактових імпульсів - 4. Обчислювальний блок 1 має вхід для зчитування інформації з вимірювальних станцій та вихід, на який надходить кінцевий результат обробки. Також він з'єднаний з блоком пам'яті, що дозволяє заносити в пам'ять інформацію і зчитувати її в ході обчислень. Крім того, обчислювальний блок з'єднаний з блоком формування тактових імпульсів, який, у свою чергу, з'єднаний з генератором тактових імпульсів.

Опис роботи пристрою. Обчислювальний блок являє собою сукупність логічних елементів підсумовування, виражування та множення і створений таким чином, щоб виконував обчислення згідно узагальненому методу за рекурентною формулою:

$$r_{v+1} = r_v + \left(\frac{m f_{jv} T}{\sum_{j=1}^m \sigma_{\xi_j}^2} \right)^{-1} \frac{m f_{jv}}{\sum_{j=1}^m \sigma_{\xi_j}^2} [\xi_j - \xi_j(r_v)]$$

де $r_{v+1} - (v+1)$ - е наближення;

$r_v - v$ - е наближення;

σ_{jv}^2 - дисперсія помилки області шуканої оцінки;

f_{jv} - вектор-стовбець часткових похідних;

ξ_j - рівняння поверхонь положення.

Обчислювальний блок містить наступні частини:

- блок обчислення напрямку градієнта поля;
- блок ітеративного обчислення статистичної оцінки;
- блок обчислення часткових похідних;
- блок обчислення суми векторних помилок;
- блок обчислення вектора-виправлення;
- блок обчислення добутків матриці на вектор;
- блок обчислення детермінанта матриці;
- блоку обчислення результату.

Обчислювальний блок 1 керується імпульсами, що надходять із блоку формування тактових імпульсів 3. Ці імпульси служать сигналами до виконання обчислень у тій чи іншій частині обчислювального блоку згідно узагальненого методу обробки даних результатів вимірів, що реалізують просторову надмірність.

Блок пам'яті 2 являє собою мікросхему ОЗП (RAM), у яку на кожній ітерації обчислення за рекурентною формулою заносяться результати обчислень і потім зчитуються для подальших обчислень.

Генератор тактових імпульсів 4 являє собою типовий генератор прямокутних імпульсів зі шпаруватістю рівною 2. Він генерує імпульси, що надходять на блок формування тактових імпульсів 3.

Блок формування тактових імпульсів 3 перетворює імпульси, що надходять на його вхід з генератора тактових імпульсів 4, в імпульси та імпульсні послідовності, необхідні для обчислювального блоку.

Таким чином, використання запропонованого пристрою забезпечить підвищення точності та ві-

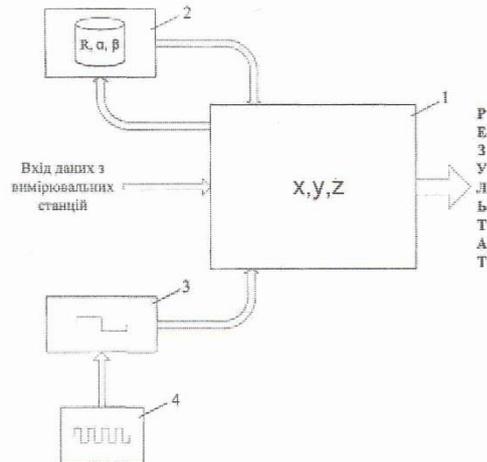
5

83522

6

рогідності визначення вторинних координат положення та руху космічних і повітряних літальних

апаратів за рахунок обробки просторово надмірного набору первинної траєкторної інформації.





УКРАЇНА

(19) UA (11) 20124 (13) U
(61) МПК (2006)
G01D 1/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1

(21) u200607349
(22) 03.07.2006
(24) 15.01.2007
(46) 15.01.2007, Бюл. № 1, 2007 р.
(72) Мотильов Костянтин Ігорович, Михайлов Максим Володимирович, Щербов Ігор Леонідович, Пасльон Володимир Володимирович
(73) ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(57) 1. Пристрій для обробки даних результатів вимірювань, що містить обчислювальний блок і блок пам'яті, виконаний з можливістю занесення в пам'ять результатів вимірювань і обчислень, який відрізняється тим, що пристрій додатково містить блок формування тактових імпульсів, виконаний з можливістю керування обчислювальним блоком і блоком пам'яті за допомогою подачі певних послідовностей імпульсів, і генератор тактових імпульсів, виконаний з можливістю подачі тактових імпульсів на блок формування тактових імпульсів для забезпечення можливості останнього виконувати свої функції, а обчислювальний блок виконаний з

2

можливістю реалізації узагальненого методу обробки даних результатів вимірювань, що реалізує просторову надмірність.
2. Пристрій за п. 1, який відрізняється тим, що обчислювальний блок виконаний з можливістю обробки даних результатів вимірювань, отриманих одночасно не менше ніж від двох вимірювальних станцій, і забезпечує точність простих методів обробки даних результатів вимірювань при обробці інформації від однієї вимірювальної станції.
3. Пристрій за пп. 1, 2, який відрізняється тим, що обчислювальний блок виконаний з можливістю урахування нерівноточності вимірювальних засобів, дані результатів вимірювань яких надходять на вхід обчислювального блока.
4. Пристрій за п. 3, який відрізняється тим, що обчислювальний блок виконаний з можливістю зменшення впливу на результат збійних значень параметрів.
5. Пристрій за кожним з попередніх пунктів, який відрізняється тим, що він виконаний у вигляді мікросхеми на одній підкладці.

Корисна модель відноситься до області спеціалізованих засобів обчислювальної техніки паралельно-конвеєрного типу і може бути використана в системах автоматизованої обробки даних вимірів, інформаційно-вимірювальних системах та інформаційно-обчислювальних комплексах.

Відомий пристрій для збору та обробки інформації в автоматизованих системах керування повітряним рухом [Грачев В.В., Кейн В.М. Радиотехническое средства управления воздушным движением. М., «Транспорт», 1975г. с.259, 344с.]. Пристрій складається з трьох основних частин: датчики інформації, пристрій обробки інформації та пристрій відображення інформації. Даний пристрій застосовується в автоматизованих системах керування повітряним рухом для обробки та подання в заданій формі траєкторної інформації. Але він має недоліки, головним з яких є неможливість урахування надмірної первинної інформації траєкторних вимірювальних засобів з метою підвищення точності визначення вторинних координат по-

ложення об'єктів.

Найбільш близьким аналогом пристрою, що заявляється, є пристрій обробки даних результатів вимірів [RU 2003137663A МПК7 G01D1/00, опубл. 10.06.2005г.]. Пристрій містить обчислювальний блок, блок пам'яті і блок інтерфейсу, причому блок пам'яті має 5 областей пам'яті, що служать для запису різних даних у відповідні області пам'яті. Однак даний пристрій має недолік: він не забезпечує високу точність і вірогідність результатів через неможливість урахування надмірної первинної траєкторної інформації.

В основу корисної моделі покладена задача підвищення точності та вірогідності визначення вторинних координат положення й руху космічних та повітряних літальних апаратів за рахунок обробки просторово надмірного набору первинної траєкторної інформації.

Основні ознаки пристрою, що заявляється, співпадаючі з ознаками найближчого аналога: обчислювальний блок і блок пам'яті, виконаний з

(19) UA (11) 20124 (13) U

3

20124

4

можливістю занесення пам'ять результатів вимірів та обчислень.

Поставлена задача вирішується таким чином, що пристрій для обробки даних результатів вимірів, який характеризується тим, що він містить обчислювальний блок і блок пам'яті, виконаний з можливістю занесення в комірки пам'яті результатів вимірів і обчислень, який згідно корисної моделі додатково містить блок формування тактових імпульсів, виконаний з можливістю керування обчислювальним блоком і блоком пам'яті за допомогою подачі певних послідовностей імпульсів, і генератор тактових імпульсів, виконаний з можливістю подачі тактових імпульсів на блок формування тактових імпульсів для забезпечення можливості останнього виконувати свої функції, а обчислювальний блок виконаний з можливістю реалізації узагальненого методу обробки даних результатів вимірів, що реалізує просторову надмірність.

Доцільно, але не обов'язково виконувати обчислювальний блок з можливістю обробки даних результатів вимірів, отриманих одночасно не менш чим від двох вимірювальних станцій, при цьому він забезпечує точність простих методів обробки даних результатів вимірів при обробці інформації від однієї вимірювальної станції, окрім того, обчислювальний блок виконаний з можливістю урахування нерівноточності вимірювальних засобів, дані результатів вимірів яких надходять на вхід обчислювального блоку, при цьому обчислювальний блок виконаний з можливістю зменшення впливу на результат збійних значень параметрів. Також доцільно виконувати пристрій у виді мікросхеми на одній підкладці.

Причинно-наслідковий зв'язок ознак, що визначають суть корисної моделі з технічним результатом. На вхід пристрою подаються первинні координати з трьох різних вимірювальних станцій. На виході пристрою маємо результат обробки трьох наборів координат - уточнені вторинні координати об'єкта, що спостерігається. У той же час, при подачі на вхід первинної інформації мінімально-необхідного обсягу (з однієї станції), на виході одержуємо вторинні координати з точністю обробки вже відомих пристроїв. Блок формування тактових імпульсів керує обробкою інформації в обчислювальному блоці за допомогою подачі певних тактових сигналів від генератора тактових імпульсів. Конструкція передбачає виконання пристрою у виді мікросхеми.

Зазначені ознаки визначають сутність корисної моделі, наведеної на Фіг., на якій представлена структурна схема пристрою обробки даних результатів вимірів, де обчислювальний блок - 1, блок пам'яті - 2, блок формування тактових імпульсів - 3, генератор тактових імпульсів - 4. Обчислювальний блок 1 має вхід для зчитування інформації з вимірювальних станцій та вихід, на який надходить кінцевий результат обробки. Також він з'єднаний з блоком пам'яті, що дозволяє заносити в пам'ять інформацію і зчитувати її в ході обчис-

лень. Крім того, обчислювальний блок з'єднаний з блоком формування тактових імпульсів, який, у свою чергу, з'єднаний з генератором тактових імпульсів.

Опис роботи пристрою.

Обчислювальний блок являє собою сукупність логічних елементів підсумовування, вирахування та множення і створений таким чином, щоб виконував обчислення згідно узагальненому методу за рекурентною формулою:

$$r_{v+1} = r_v + \left(\sum_{j=1}^m \frac{f_{jv} f_{jv}^T}{\sigma_{ij}^2} \right)^{-1} \sum_{j=1}^m \frac{f_{jv}}{\sigma_{ij}^2} [r_j - \xi_j(r_v)]$$

де r_{v+1} - $(v+1)$ - е наближення;

r_v - v - е наближення;

σ_{ij}^2 - дисперсія помилки області шуканої оцінки;

ки;

f_{jv} - вектор-стовбець часткових похідних;

ξ_j - рівняння поверхонь положення.

Обчислювальний блок містить наступні частини:

- блок обчислення напрямку градієнта поля;
- блок ітеративного обчислення статистичної оцінки;
- блок обчислення часткових похідних;
- блок обчислення суми векторних помилок;
- блок обчислення вектора-виправлення;
- блок обчислення добутків матриці на вектор;
- блок обчислення детермінанта матриці;
- блоку обчислення результату.

Обчислювальний блок 1 керується імпульсами, що надходять із блоку формування тактових імпульсів 3. Ці імпульси служать сигналами до виконання обчислень у тій чи іншій частині обчислювального блоку згідно узагальненого методу обробки даних результатів вимірів, що реалізують просторову надмірність.

Блок пам'яті 2 являє собою мікросхему ОЗП (RAM), у яку на кожній ітерації обчислення за рекурентною формулою заносяться результати обчислень і потім зчитуються для подальших обчислень.

Генератор тактових імпульсів 4 являє собою типовий генератор прямокутних імпульсів зі шпаруватістю рівною 2. Він генерує імпульси, що надходять на блок формування тактових імпульсів 3.

Блок формування тактових імпульсів 3 перетворює імпульси, що надходять на його вхід з генератора тактових імпульсів 4, в імпульси та імпульсні послідовності, необхідні для обчислювального блоку.

Таким чином, використання запропонованого пристрою забезпечить підвищення точності та вірогідності визначення вторинних координат положення та руху космічних і повітряних літальних апаратів за рахунок обробки просторово надмірного набору первинної траєкторної інформації.

В приложении Б представлены полученные в результате исследования (для всех вариантов вводимых аномальных ошибок измерений) графики зависимостей (от времени) разности между измеренным значением дальности и истинным значением дальности до сглаживания и после сглаживания (без сбоя и со сбоем) для трех вариантов обработки при числе точек на интервале сглаживания $n = 9$ и графики зависимостей (от времени) разности между сглаженными значениями вторичных координат $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат (без сбоя и со сбоями).