

На правах рукописи



Щербов Игорь Леонидович

**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ
ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Паслён Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «ДонНТУ» (г. Донецк),
заведующий кафедрой «Радиотехника
и защита информации»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Вытовтов Константин Анатольевич
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской
академии наук (ИПУ РАН) (г. Москва)

доктор технических наук, профессор
Соколов Сергей Викторович
Федеральное государственное бюджетное
учреждение высшего образования «Ростовский
государственный университет путей сообщения»
(г. Ростов-на-Дону)

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем
управления и радиотехники» (г. Томск)

Защита состоится «30» ноября 2023 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета 99.2.107.02 в ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу: 347922, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1, ауд. Г-439.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу 344000, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21ж и на сайте www.sfedu.ru

Отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью организации, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета 99.2.107.02 по адресу: 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ауд. Г-144.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.107.02,
доктор технических наук, доцент



(подпись)

Ю.А. Кравченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Развитие систем обработки данных внешнетраекторных измерений, например, летательных аппаратов (ЛА), придает особую актуальность вопросам повышения точности и достоверности полученных результатов 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.

На начальном этапе обработки траекторной информации широко применялись простые методы, при этом использовавшиеся алгоритмы обработки имели ряд недостатков, которые приводили к снижению точности и достоверности получаемых результатов.

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, также, как и простые, имели ряд своих недостатков. Исходя из этого, возникла необходимость в разработке методов и алгоритмов, которые бы позволили осуществлять совместную реализацию (обработку) пространственной и временной избыточности получаемых данных [7, 10].

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 задачей.

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 внешнетраекторных измерений. Создание службы внешнетраекторных 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.

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.

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.

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

Результаты исследований проходили апробацию и находили свое применение на испытательных полигонах ВВС [7, 10].

Вопросы обработки данных траекторных измерений исследовались в работах как отечественных: Жданюка Б.Ф., Агаджанова П.А., Булычева Ю.Г., Еналеева С.Ф., так и зарубежных авторов: Тьюки Дж., Хьюбера П. 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 Л-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 А-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 нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений, адаптирующихся к стохастической траектории испытываемого объекта на каждом шаге локально-скользящего сглаживания. Реализация в алгоритмах решения, устойчивого к аномальным ошибкам измерений, позволяет осуществлять обработку получаемых первичных данных о траектории ЛА без их отбраковки. Полученные результаты вычислительного эксперимента показали преимущества разработанных алгоритмов по сравнению с существующими аналогами и могут быть использованы для послеполетной обработки данных траекторных измерений в траекторном измерительно-вычислительном комплексе.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования базируется на строгости математических выкладок, публикациях в рецензируемых изданиях, полученных патентах на изобретение и полезную модель, актах о внедрении результатов 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) 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.

Краткое содержание работы

Во введении сформулированы актуальность и степень разработанности темы исследований; цель, задачи и научные положения, выносимые на защиту; данные о научной новизне, теоретической и практической ценности диссертационной работы; результаты апробации и внедрения полученных результатов.

В первой главе диссертационного исследования проведен анализ состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов, назначения входящих в него систем и выполняемых задач. На основании проведенного анализа установлено, что одним из направлений совершенствования траекторных измерительно-вычислительных комплексов является разработка новых методов и алгоритмов обработки данных траекторных измерений.

С этой целью, 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. Показано, что особенностью полученных данных внешнетраекторных измерений является пространственная и временная избыточность.

Проведенный анализа позволяет сделать вывод о том, что существующие методы и алгоритмы 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 [7, 10].

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.

Во второй главе были решены четыре задачи диссертационного исследования.

При решении первой задачи исследования были построены и исследованы структуры линейно независимых (ЛНБФ) и Λ -ортогональных (Λ -ОБФ) базисных функций.

Для осуществления сглаживания путем совместной обработки внешнетраекторных данных, обладающих пространственной и временной избыточностью, исследованы две клеточно-матричные структуры базисных функций [3, 4].

Первая структура:

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} \varphi_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_z(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

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.

Соответственно предложено полиномиальное описание вектор-функции $r(t)$, определяющей положение контролируемого объекта:

$$r(t) = \varphi(t)A = \begin{bmatrix} \varphi_x(t) & 0 & 0 \\ 0 & \varphi_y(t) & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_z(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t, A_x) \\ y(t, A_y) \\ z(t, A_z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

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

Вторая структура имеет вид:

$$\varphi(t, \tau) = \begin{bmatrix} \varphi_{00}(t, \tau_x) \varphi_{01}(t, \tau_x) \varphi_{02}(t, \tau_x) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_x) \varphi_{m1}(t, \tau_x) \varphi_{m2}(t, \tau_x) \\ \varphi_{00}(t, \tau_y) \varphi_{01}(t, \tau_y) \varphi_{02}(t, \tau_y) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_y) \varphi_{m1}(t, \tau_y) \varphi_{m2}(t, \tau_y) \\ \varphi_{00}(t, \tau_z) \varphi_{01}(t, \tau_z) \varphi_{02}(t, \tau_z) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_z) \varphi_{m1}(t, \tau_z) \varphi_{m2}(t, \tau_z) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

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.

Соответственно, полиномиальное описание вектор-функции $r(t)$, определяющей положение контролируемого объекта, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} r(t, \tau, A) &= \varphi(t, \tau)A = \\ &= \begin{bmatrix} \varphi_{00}(t, \tau_x) \varphi_{01}(t, \tau_x) \varphi_{02}(t, \tau_x) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_x) \varphi_{m1}(t, \tau_x) \varphi_{m2}(t, \tau_x) \\ \varphi_{00}(t, \tau_y) \varphi_{01}(t, \tau_y) \varphi_{02}(t, \tau_y) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_y) \varphi_{m1}(t, \tau_y) \varphi_{m2}(t, \tau_y) \\ \varphi_{00}(t, \tau_z) \varphi_{01}(t, \tau_z) \varphi_{02}(t, \tau_z) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_z) \varphi_{m1}(t, \tau_z) \varphi_{m2}(t, \tau_z) \end{bmatrix} \cdot \|A\| = \begin{bmatrix} \varphi(t, \tau_x)A \\ \varphi(t, \tau_y)A \\ \varphi(t, \tau_z)A \end{bmatrix}, \quad (4) \end{aligned}$$

где $A^T = \|a_{00}a_{01}a_{02}\dots a_{k0}a_{k1}a_{k2}\dots a_{m0}a_{m1}a_{m2}\|$; a_{kl} – коэффициенты сглаживающего полинома; $k=0,\dots,m$ – степень сглаживающего полинома; $l = 0, 1, 2$.

Стохастический характер траектории ЛА вносит существенную особенность в решение задачи оптимальной оценки вектора A – коэффициентов сглаживающего полинома. Из-за нелинейной зависимости вектора измерений от вектора коэффициентов сглаживающего полинома решение задачи по определению максимально достоверного значения (МДЗ) вектора $\hat{A}$ следует искать методом последовательных приближений. Для совместной реализации пространственной и временной избыточности данных измерений с целью определения статистической оценки (СО) вектора A – коэффициентов сглаживающего полинома, с учетом получен универсальный итеративный алгоритм:

$$\hat{A}_{v+1} = \hat{A}_v + \Delta\hat{A}_v = \hat{A}_v + (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda \{\xi - \xi[r(t, A_v)]\}, \quad (5)$$

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

Тогда из (5) следует, что СО достигается через ряд последовательных приближений, в которых основным моментом является решение линеаризованной системы уравнений с целью определения вектора поправки $\Delta\hat{A}_v$. Указанный алгоритм инвариантен к закону распределения ошибок траекторных измерений, что очень важно для его практической реализации [3, 4].

При решении второй задачи исследования был предложен и обоснован способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома.

Решим систему уравнений:

$$\varphi^T \varphi C = \varphi^T r^*, \quad (6)$$

где φ – базисная функция; C – вектор-столбец коэффициентов полинома; r^* – вектор-столбец вторичных координат, рассчитанный по минимально необходимому набору первичных измерений ξ^* ; $\varphi^T \varphi$ – основная матрица системы уравнений. Умножив (6) слева на матрицу, обратную основной матрице, получим решение системы уравнений в виде вектора коэффициентов полинома:

$$\hat{C} = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T r^*, \quad (7)$$

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

Как видно из работ [3, 4], (6) имеет единственное решение, если определитель основной матрицы системы уравнений не равен нулю, то есть $\det(\varphi^T \varphi) \neq 0$. При использовании базисных функций (1) и (3) основная матрица системы уравнений (6) является симметричной. Умножив (7) слева на матрицу φ , получим начальное приближение вектора вторичных координат в виде:

$$\hat{r}_0 = \varphi \hat{C} = \varphi (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T r^*. \quad (8)$$

Пересчитав сглаженные значения начального приближения вторичных координат по известным формулам [3, 4] в первичные координаты, получим начальное приближение первичных координат $\hat{\xi}_0$.

Таким образом, последовательность решения задачи о нахождении начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, а также начальные приближения первичных и вторичных координат, имеет следующий вид:

$$\xi^* \rightarrow r^* \rightarrow \varphi \rightarrow \varphi^T \varphi \rightarrow (\varphi^T \varphi)^{-1} \rightarrow (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T \rightarrow \hat{C}_0 \rightarrow \hat{r}_0 \rightarrow \hat{\xi}_0. \quad (9)$$

Последовательность решения задачи нахождения МДЗ, после нахождения начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, можно представить в виде:

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{\Delta a} \\ \hat{C}_v \rightarrow \hat{r}_v \rightarrow \hat{\xi}_v \rightarrow \Phi_v \rightarrow \Delta \hat{C}_v \rightarrow \hat{C}_{v+1} \rightarrow \hat{r}_{v+1} \rightarrow |\Delta \hat{r}_v| > \varepsilon, \end{array} \quad (10)$$

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

При решении третьей задачи были разработаны и исследованы методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома, нашедшие свое применение в алгоритмах адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений: нелинейное адаптивное сглаживание с оптимизацией степени и структуры (предусматривает два варианта Структура 1 и Структура 2) сглаживавшего полинома [1].

Из работ [1, 3, 4] известно, что применение структур Λ -ОБФ в алгоритме нелинейного сглаживания позволяет получить независимые оценки коэффициентов сглаживающего полинома и некоррелированность их ошибок. Это позволяет, решать задачу оптимизации степени или структуры сглаживающего полинома путём установления значимости коэффициентов сглаживающего полинома.

Проверка статистических гипотез о их значимости проводилась по критерию Фишера:

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

где $\chi=0, 1, 2$; $k = 0, \dots, m_{\max}$ [1].

На основании полученных результатов была решена четвертая задача диссертационного исследования. Разработанные алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& \varphi \rightarrow \xi \rightarrow \xi^* \rightarrow r^* \rightarrow \hat{C}_V \rightarrow \hat{r}_V \rightarrow \Delta \hat{\xi}_V \rightarrow F_V \rightarrow \Phi_V \rightarrow P_V \rightarrow J_V \rightarrow \\
& \rightarrow \alpha_V \rightarrow U_V \rightarrow \Delta \hat{A}_V \rightarrow \hat{A}_V \rightarrow \hat{A}_{V+1} \rightarrow \hat{r}_{V+1} \rightarrow |\Delta r_V| > \varepsilon \xrightarrow{\text{да}} U_n \rightarrow P \rightarrow \tilde{A} \rightarrow \\
& \rightarrow F_{1,V} \rightarrow m \leq m_{\max} \xrightarrow{\text{нет}} \text{если } F_{1,V} > F_{1,V,\alpha}, \text{ то } a_{kl}^* = a_{kl} \\
& \text{иначе } a_{kl}^* = 0 \rightarrow A^* \rightarrow \hat{r}
\end{aligned}$$

Работа алгоритмов может быть представлена следующим образом [1, 3, 4]:

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 (3) с учетом заданных $m_{\max}$ и τ_x, τ_y, τ_z .
3. На заданном интервале формируется вектор измерений из $N * n$ точек.
4. Формируется вектор не сглаженных значений вторичных координат.
5. Формируется стартовая система координат на основе местной системы вторичных координат.
6. Проводится оценка коэффициентов сглаживающего полинома (7) на основании (6).
7. Определяется начальное (8), а затем, сглаженные значения начального приближения первичных координат (9).
8. Формируется вектор начального приближения первичных координат (состоящий из $N * n$ точек).
9. Определяется значение вектора отклонений: $\Delta \tilde{\xi}_0 = \xi - \hat{\xi}_0$.
10. Определяются проекции градиентов первичных данных измерений [3, 4].
11. Формируется матрица проекций.
12. По значениям, полученным в пункте 11, формируется матрица Якоби.
13. Проводится построение системы Λ -ОБФ на основе ЛНБФ двух переменных:

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

где $\alpha_{\chi\lambda,kl} = -\frac{\Phi_{kl}^T \Delta J_{\chi\lambda}}{J_{\chi\lambda}^T \Delta J_{00\chi\lambda}}$ - матрица вспомогательных коэффициентов.

14. Формируется матрица вспомогательных коэффициентов α_V .
15. Формируется верхняя треугольная матрица:
$$U_{\chi\lambda,kl} = \sum_{p=0}^k \sum_{q=0}^{l-1} U_{\chi\lambda,pq} \alpha_{pq,kl} + \sum_{p=0}^{k-1} \sum_{q=0}^2 U_{\chi\lambda,pq} \alpha_{pq,kl}.$$
16. Формируется вектор оценки коэффициентов сглаживающего полинома $\hat{A}_V$, и определяется его очередное приближение (5).
17. Определяется значение вектора приращений вторичных координат:

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

18. 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.

19. Проводится проверка статистики по критерию Фишера.

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).

Определяется МДЗ вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома ($\hat{A}_{opt}$).

20. Определяются значения вторичных координат: $\hat{r}_{opt} = P \hat{A}_{opt}$. Полученные значения записываются в базу данных.

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

22. По окончании обработки данных траекторных измерений полученные результаты предоставляются в удобной для пользователя форме.

В третьей главе представлены результаты решения пятой задачи диссертационного исследования.

Были проведены экспериментальные исследования функционирования разработанных алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений на предмет их функционирования в нормальных условиях работы и устойчивости к аномальным ошибкам измерений. Экспериментальное исследование осуществлялось путём имитационного моделирования на основе разработанной методики проведения эксперимента. С целью сравнительного анализа результатов работы алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений была введена система показателей качества и эффективности [6].

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:

$$W_{ij} = \frac{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}}}{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}}^*}.$$

Показатель эффективности, определяет отношение приращения результатов точности определения местоположения ЛА:

$$\mu_{ij} = \frac{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}} - \hat{\sigma}_{\xi_{ijид}}}{\hat{\sigma}_{\xi_{ij}}},$$

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; $\hat{\sigma}_{\hat{\xi}_{ijид}}$ – оценка СКО в i -ой точке j -траектории после идеального сглаживания.

Под понятием траектории после идеального сглаживания принимались смоделированные (идеальные) результаты, так как стохастический характер реальных траекторий трудно совместим с их высокой априорной определенностью [2, 5, 6, 11].

Средние значения показателей качества и эффективности исследуемых методов сглаживания для интервалов сглаживания в 25, 17, и 9 точек представлены в таблице 1.

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		
		<i>w</i>	<i>μ</i>	<i>w</i>	<i>μ</i>	<i>w</i>	<i>μ</i>	<i>w</i>
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
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
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. Метод нелинейного адаптивного сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 превосходит по всем показателям два других метода.

2. Для всех методов наилучшие показатели качества и эффективности сглаживания выше в пределах 3/5 интервала и снижаются на краях интервала.

На следующем этапе проводилось исследование качества и эффективности работы алгоритмов с некоррелированными и коррелированными ошибками измерений при работе двух радиолокационных станций. Результаты исследований представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты исследований работы алгоритма 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	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.

Таблица 3 – Показатели качества при работе алгоритма при коррелированных ошибках измерений

Количество 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
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

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

1. Наилучшие показатели качества и эффективности сглаживания выше в пределах 3/5 интервала и снижаются на краях интервала.

2. Показатели качества и эффективности работы алгоритмов практически не изменяются при различных значениях СКО средств измерения.

3. Отмечается зависимость показателя точности от соотношения количества точек на интервале сглаживания к времени корреляции. Точность получаемых результатов увеличивается с увеличением этого отношения.

В дальнейшем, на основе разработанной методики было проведено экспериментальное исследование 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 сбоя (одиночных и групповых) в получаемые результаты измерений.

В таблице 4 приведены результаты экспериментального исследования при обработке данных многопараметрических измерений без сбоя с интервалом сглаживания $n = 21$.

Таблица 4 – Результаты исследования при обработке данных многопараметрических измерений без сбоя

Точек	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}	
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

Из результатов экспериментального исследования, можно сделать вывод, что с увеличением избыточности получаемых данных от радиолокационных станций, выигрыш в точности возрастает от 1,12 до 2,38 раз, а при совместной обработке данных радиолокационными и кинотеодолитными станциями выигрыш в точности составляет от 1,97 до 5,75 раз.

На рисунках 1 - 3 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 $n = 9$.

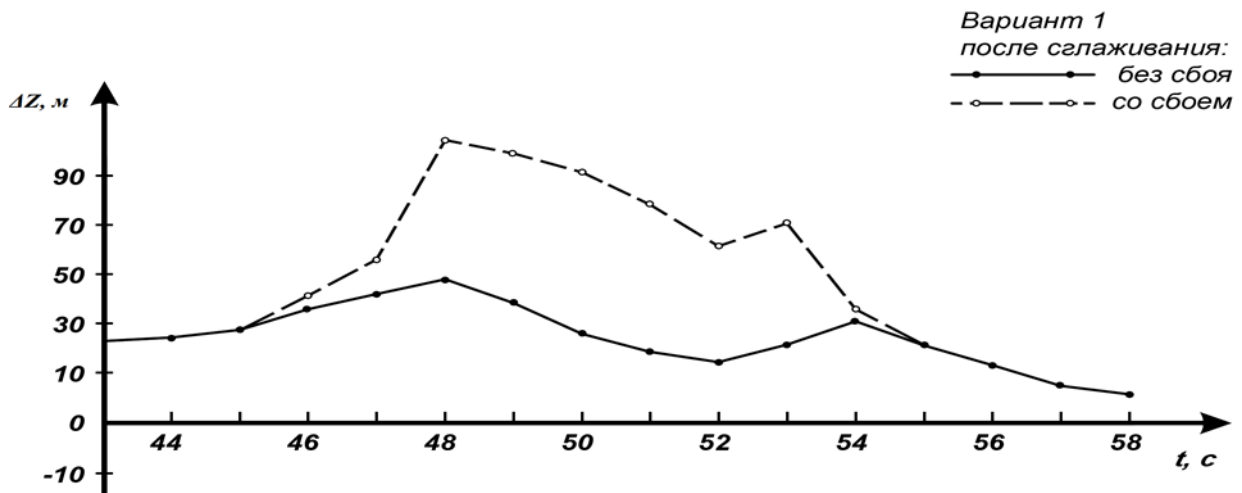


Рисунок 1 – График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1

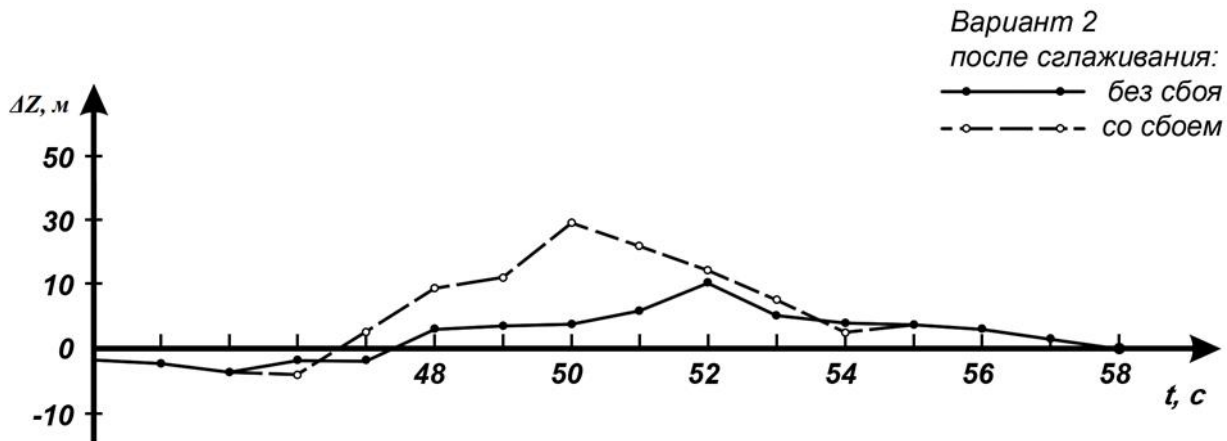


Рисунок 2 – График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1 и РЛС 2

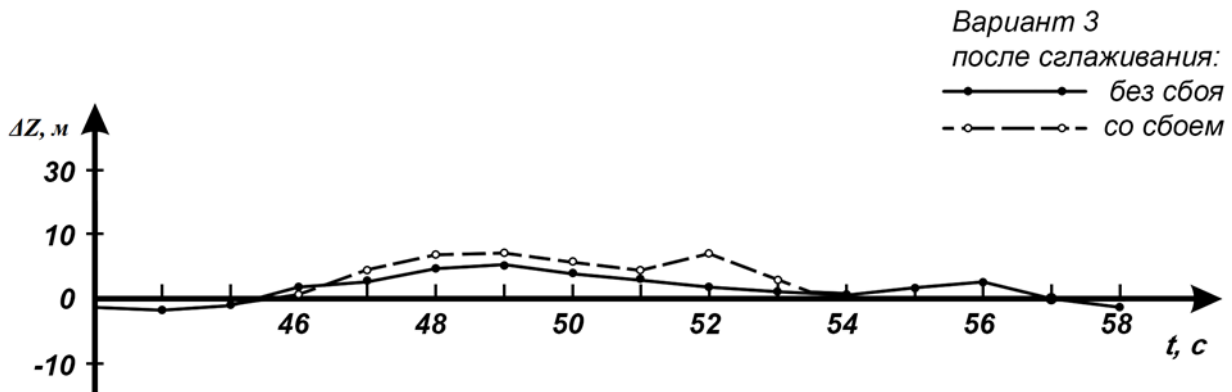


Рисунок 3 – График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1, РЛС 2, РЛС 3

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 [2, 5, 6, 11].

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 внедрены в учебный процесс на кафедрах «Радиотехника и защита информации» и «Автоматика и телекоммуникации» факультета «Компьютерных информационных технологий и автоматики» 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Щербов, И. Л. Исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома / И.Л. Щербов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 3(233). – С. 134-143. – Режим доступа: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/article/view/809/997 (дата обращения 22.08.2023)

2. Щербов, И. Л. Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений / И. Л. Щербов // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 378-384. – DOI 10.24151/1561-5405-2023-28-3-378-384

3. Щербов, И. Л. Исследование области определения параметров базисной функции двух аргументов при построении Λ -ортогональной базисной функции / И. Л. Щербов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6(230). – С. 106-116. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-106-116

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК ДНР:

4. Щербов, И. Л. Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функций / И. Л. Щербов, В. В. Паслен // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – № 1(25). – С. 48-53

5. Щербов, И. Л. Информационные технологии математического моделирования обработки данных траекторного контроля / И. Л. Щербов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 71-77

6. Щербов, И. Л. Исследование алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений / И. Л. Щербов // Информатика и кибернетика. – 2020. – № 4(22). – С. 5-11

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Украины:

7. Совместная обработка данных траекторных измерений наземных и воздушных измерительных средств / Паслен В. В., Щербов И. Л., Мотылев К. И., Михайлов М. В // Научные труды Донецкого национального технического

университета. Серия: Горно-геологическая. – 2006. – Т. 111, № 2. – С. 55-73. – Режим доступа: <http://ea.donntu.ru/handle/123456789/13212> (дата обращения 22.08.2023)

Патенты на изобретения и полезные модели:

8. Патент № 83522 С2 Украина, МПК (2006), G01D 1/00, G01D 3/00. Устройство для обработки данных результатов измерений : № а200607350 : заявл. 03.07.2006 : опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14 / Мотылев Костантин Игоревич, Михайлов Максим Владимирович, Щербов Игорь Леонидович, Паслён Владимир Владимирович ; патентообладатель Донецкий национальный технический университет. – Режим доступа: <https://uapatents.com/3-83522-pristriij-dlya-obrobki-danikh-rezultativ-vimiryuvan.html> (дата обращения 22.08.2023)

9. Патент № 20124 U Украина, МПК (2006), G01D 1/00. Устройство для обработки данных о результатах измерений : № u200607349 : заявл. 03.07.2006 : опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1 / Мотылев Костантин Игоревич, Михайлов Максим Владимирович, Щербов Игорь Леонидович, Паслён Владимир Владимирович ; патентообладатель Донецкий национальный технический университет. – Режим доступа: <https://uapatents.com/3-20124-pristriij-dlya-obrobki-danikh-rezultativ-vimiryuvan.html> (дата обращения 22.08.2023)

Публикации в других изданиях:

10. Методи обробки даних вимірів, які володіють просторовою та часовою надмірністю / К. І. Мотильов, М. В. Михайлов, І. Л. Щербов, В. В. Пасльон // Системные технологии. – 2006. – №5(46). – С. 95-100. – Режим доступа: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/issue/view/98/71> (дата обращения 22.08.2023)

11. Щербов, И. Л. Математическое моделирование обработки данных траекторного контроля / И. Л. Щербов // Актуальные проблемы обеспечения национальной безопасности : материалы Международной научно-практической конференции, 17 декабря 2020 г., г. Донецк. – Донецк : Издательство Донецкого национального университета, 2021. – С. 97-103

Личный вклад автора.

В работах:

[7, 10] – автором проведен анализ состава и структуры типовых траекторных измерительно-вычислительных комплексов, назначение входящих в него систем и требований предъявляемых им; анализ существующих категорий траекторий и способов их описания; исследование методов и алгоритмов обработки данных траекторных измерений, применявшихся и применяемым в автоматизированных процессах послеполетной обработки данных траекторных измерений в траекторных измерительно-вычислительных комплексах.

[1, 3, 4, 7] – автором проведены исследования разработанных структур ЛНБФ и Λ -ортогональных базисных функций, позволяющих осуществлять совместную обработку избыточных (временных и пространственных) данных траекторных измерений; 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; исследованы разработанные методы проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома: с оптимизацией степени сглаживавшего полинома и с оптимизацией структуры сглаживающего полинома Структура 1 и Структура 2; разработаны алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

[2, 5, 6, 11] – автором 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.