

УДК 519.254

Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-171-180

Для цитирования: Караванов А. В., Михов Е. Д. Применение непараметрической оценки функции регрессии для увеличения точности решения навигационной задачи // Сибирский аэрокосмический журнал. 2025. Т. 26, № 2. С. 171–180. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-171-180.

For citation: Karavanov A. V., Mikhov E. D. [Application of nonparametric estimation of the regression function to increase the accuracy of navigation problem solution]. *Siberian Aerospace Journal*. 2025, Vol. 26, No. 2, P. 171–180. Doi: 10.31772/2712-8970-2025-26-2-171-180.

Применение непараметрической оценки функции регрессии для увеличения точности решения навигационной задачи

А. В. Караванов*, Е. Д. Михов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярский край, г. Красноярск, просп. Свободный, 79г
E-mail: karavanov_92@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача восстановления пропущенных данных при решении навигационной задачи с использованием спутниковых навигационных систем. В рамках исследования была выявлена корреляционная связь между изменениями псевдодальностей (расстояние от объекта до навигационного спутника, вычисленное с учетом погрешности шкалы времени потребителя). Иначе говоря, изменение расстояния между приёмником и одним спутником взаимосвязано с изменением расстояния между приёмником и другим спутником. На основе обнаруженной зависимости была сформулирована гипотеза того, что приращение псевдодальности относительно предшествующего момента времени на коротком временном отрезке изменяется линейно. Для подтверждения этой гипотезы был построен график, который её подтвердил. Предложен непараметрический алгоритм восстановления пропущенных данных на основании этой гипотезы. В рамках исследования в измерения псевдодальностей были внесены случайные пропуски. Цель внесения пропусков – смоделировать условия, в которых навигационный приемник теряет сигнал от некоторых навигационных спутников (например, в связи с высокой плотностью застройки). После внесения пропусков был применён разработанный алгоритм для восстановления пропущенных значений. Результаты продемонстрировали, что различие между реальными и восстановленными значениями псевдодальностей не превышало более одного процента. Это позволяет подтвердить эффективность разработанного алгоритма в решении навигационной задачи для условий потери сигнала от спутников.

Ключевые слова: восстановление пропусков, непараметрическая оценка функции регрессии, решение навигационной задачи, ГЛОНАСС.

Application of nonparametric estimation of the regression function to increase the accuracy of navigation problem solution

A. V. Karavanov*, E. D. Mikhov

Siberian Federal University
79g, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation,
E-mail: karavanov_92@mail.ru

Abstract. The article deals with the task of missing data recovery when solving a navigation problem using satellite navigation systems. The study revealed a correlation relationship between the changes in pseudo-distance (the distance from the object to the navigation satellite calculated taking into account the

error of the consumer's time scale). In other words, the change in the distance between the receiver and one satellite is correlated with the change in the distance between the receiver and another satellite. On the basis of the discovered dependence was formed the hypothesis that the increment of pseudodistance relative to the previous moment of time on a short time interval changes linearly. To confirm this hypothesis, a graph was constructed, which confirmed it. A nonparametric algorithm for recovering missing data based on this hypothesis was proposed. As part of the study, random omissions were introduced into the pseudo-distance measurements. The purpose of the skips was to simulate conditions in which a navigation receiver loses signal from some navigation satellites (e.g., due to high building density). After the skip insertion, the developed algorithm was applied to recover the missed values. The results showed that the difference between the real and reconstructed pseudo-distance values did not exceed one percent. This allows us to confirm the effectiveness of the developed algorithm in solving the navigation problem for conditions of signal loss from satellites.

Keywords: skip recovery, nonparametric regression function estimation, navigation problem solving, GLONASS.

Введение

Описание задачи

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) помогают определить местоположение и время при помощи специальных спутников. Самыми известными системами являются GPS, созданная в США, ГЛОНАСС из России, Galileo от Евросоюза и Beidou, разработанная в Китае.

Сегодня спутниковые навигационные системы – это неотъемлемая часть нашей жизни. У технологии ГНСС есть множество практических применений [1–3]:

- с помощью ГНСС люди и транспортные средства могут определять своё местоположение и прокладывать маршрут. Это особенно полезно, когда нет других ориентиров или нужно быстро добраться до нужного места;
- спутниковая навигация помогает создавать точные карты и определять координаты различных объектов. Это важно для строительства, сельского хозяйства, управления природными ресурсами и других сфер деятельности;
- в военной сфере спутниковая навигация обеспечивает точное позиционирование и навигацию для проведения операций;
- спутниковая навигация применяется для управления беспилотными летательными аппаратами.

Однако у спутниковых навигационных систем есть и недостатки:

- спутниковые сигналы могут искажаться из-за различных факторов, таких как погодные условия или технические проблемы;
- в городских условиях, местах с плотной застройкой или лесными массивами спутниковая навигация может иметь некоторую погрешность в определении местоположения;
- работоспособность и доступность спутников влияет на функциональность системы (если спутники выходят из строя или становятся недоступными, система перестаёт работать).

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) активно применяются в управлении беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Однако при использовании БПЛА могут иметь место факторы, которые приводят к потере ориентации в пространстве [4; 5].

К таким факторам относятся:

- передвижение в лесу;
- воздействие радиоэлектронных помех;
- движение в сложной ландшафтной обстановке или плотной городской застройке.

Если информация о текущем местоположении теряется, это может иметь серьёзные последствия для аппарата. Чем дольше длится перерыв в определении координат, тем выше вероятность возникновения аварийной ситуации.

Одним из подходов к решению этой проблемы является использование инерциальных систем навигации. Они дополняют спутниковую систему навигации в момент «разрыва навигационного поля» [6; 7].

У этого подхода есть недостаток – масса инерциальной системы «средней точности» на лазерных или оптических гироскопах составляет более 8 кг. Из-за этого их сложно использовать на БПЛА малой и средней дальности.

В связи с тем, что для корректной работы спутниковой навигационной системы требуется не менее 4 одновременно наблюдаемых приёмником спутников, методы, которые позволяют увеличить надёжность применения ГНСС в сложных ландшафтных условиях, при высокой плотности застройки или в лесу, могут быть полезны в различных областях.

Работа посвящена разработке алгоритма, который позволит повысить надёжность решения навигационной задачи в условиях малого количества наблюдаемых НКА.

Алгоритмы восстановления значений выборки наблюдений

Как правило, для качественного восстановления значений выборки наблюдений, оставшаяся часть выборки должна быть качественной и полной. Однако в реальности по тем или иным причинам иногда возникают данные с пропусками. Это усложняет математическую обработку, поскольку смещение основных статистических характеристик, таких как среднее значение или дисперсия, возрастает с увеличением числа пропусков.

В случае решения навигационной задачи пропуски в данных обусловлены тем, что навигационный спутник «скрылся» за препятствием (гора, здание, мост и т. д.).

В математической статистике есть несколько методов работы с неполными данными [8; 9]:

- исключить некомплектные объекты из выборки – как правило, некорректный подход, поскольку в неполных данных может быть важная информация для построения модели или алгоритма управления;

- использовать специальные математические методы анализа неполных данных, такие как метод взвешивания, метод максимального правдоподобия и ЕМ-алгоритм.

- восстановить пропуски – это распространённый и эффективный способ решения проблемы. Для этого применяют методы заполнения по среднему значению или регрессии.

Рассмотрим распространённые методы по восстановлению пропусков в данных.

1. Метод k -ближайших соседей. Этот алгоритм основан на предположении, что объекты, которые похожи по значениям $n-1$ свойств, будут иметь схожее значение и для n -го свойства.

2. Метод заполнения средним – это метод, при котором недостающие данные заменяются на среднее арифметическое значение всех имеющихся наблюдений.

Этот метод не всегда подходит для работы с данными, которые имеют значительные систематические колебания или непостоянный характер.

Наиболее эффективен этот метод при работе с временными рядами, в которых сложно выделить регулярную составляющую.

3. Метод Resampling используется для того, чтобы заполнить пропуски в данных. Суть метода заключается в случайном выборе значений из исходного набора данных X_i для замены пропущенных элементов.

Анализируя эти методы видно, что для восстановления пропусков используется вектор той же переменной, которую мы и восстанавливаем. Но очевидно, что для задачи, в которой была обнаружена корреляционная зависимость между различными переменными, использование этой зависимости в решении задачи восстановления пропусков в выборке наблюдений является правильным подходом. В связи с этим было принято решение разработать новый алгоритм восстановления пропусков для этой задачи.

Анализ выборки

Сбор данных

Качество эксперимента, который проводится в реальных условиях, во многом зависит от оборудования. Если аппаратура некачественная, результаты эксперимента могут быть

интерпретированы неверно. Это может привести к ошибочным выводам относительно эффективности разработанного алгоритма.

Для проведения эксперимента был выбран навигационный приемник «ПРО-04». Рассмотрим его подробнее.

Навигационный приемник «ПРО-04» предназначен для вычисления текущих координат и скорости объекта в реальном масштабе времени в автономном и дифференциальных режимах, формирования секундной метки времени и обмена с внешним оборудованием по последовательным портам UART.

Модуль обеспечивает выполнение следующих функций:

- измерение псевдодальности до НКА ГНСС, радиальной псевдоскорости НКА ГНСС и фазы несущей частоты по сигналам ГЛОНАСС и GPS/SBAS, Galileo;
- определение и выдачу привязанных ко времени текущих координат места и текущего вектора скорости движения;
- прием и учет при решении навигационной задачи корректирующей информации в формате RTCM SC-104;
- выдачу сигнала метки времени (синхронизирующего импульса (1PPS));

Зависимость между навигационными параметрами

На начальном этапе разработки нового непараметрического алгоритма для восстановления данных в области навигационных задач был проведён эксперимент, в ходе которого была выявлена зависимость между изменениями псевдодальностей различных спутников.

Для начала необходимо дать определение понятию «псевдодальность». Псевдодальностью (Р) называется расстояние между спутником и приёмником, рассчитанное на основе времени распространения сигнала без учёта разницы во времени между часами спутника и приёмника.

Целью эксперимента было накопление псевдодальностей до всех видимых навигационных спутников с частотой измерений один раз в секунду.

Эксперимент проводился следующим образом. Антенна навигационного приёмника была установлена на стационарной платформе на крыше здания, а сам приёмник подключён к ноутбуку. Затем на ноутбуке была запущена программа и начался сбор данных. Результаты отображены в табл. 1.

Таблица 1

Часть набора измерений с псевдодальностями до навигационных спутников

Дата и время	Номер навигационного спутника	Псевдодальность до спутника (Р), мм
2024-07-10 06:30:01.000	1	15980895088
2024-07-10 06:30:01.000	8	13408743693
2024-07-10 06:30:01.000	17	16465445531
2024-07-10 06:30:01.000	26	13303756619
2024-07-10 06:30:02.000	1	15980041540
2024-07-10 06:30:02.000	8	13408433227
2024-07-10 06:30:02.000	17	16464741876
2024-07-10 06:30:02.000	26	13303506602
2024-07-10 06:30:03.000	1	15979188039
2024-07-10 06:30:03.000	8	13408122896
2024-07-10 06:30:03.000	17	16464038239
2024-07-10 06:30:03.000	26	13303256756
2024-07-10 06:30:04.000	1	15978334580
2024-07-10 06:30:04.000	8	13407812709
2024-07-10 06:30:04.000	17	16464038239
2024-07-10 06:30:04.000	26	13303007075

Следующим шагом в эксперименте было преобразование таблицы с данными о дальности до спутника в таблицу, которая показывала изменение этой дальности относительно предшествующего момента времени (ΔP).

Другими словами, для каждого момента времени вычислялась величина изменения дальности.

$$\Delta P(t) = P(t) - P(t-1).$$

Таблица 2

Часть набора ΔP навигационных спутников

Дата/время	ΔP , мм (Спутник 1)	ΔP , мм (Спутник 8)	ΔP , мм (Спутник 17)	ΔP , мм (Спутник 26)
2024-07-10 06:30:02.000	-853548	-310466	-703655	-250017
2024-07-10 06:30:03.000	-853501	-310331	-703637	-249846
2024-07-10 06:30:04.000	-853459	-310187	-703641	-249681
2024-07-10 06:30:05.000	-853421	-310038	-703656	-249502

В табл. 2 на пересечении номера спутника и времени записано значение соответствующего ΔP .

Заключительным этапом эксперимента был попарный расчет коэффициента корреляции [10] $\Delta P_i, \Delta P_j, i, j = (1, n)$, где n – количество наблюдаемых спутников.

Коэффициент показывает, есть ли линейная связь между признаками. Формула коэффициента корреляции Пирсона позволяет точно определить тесноту этой связи, если она имеет линейный характер. Поэтому коэффициент также называют коэффициентом линейной корреляции Пирсона.

Если коэффициент корреляции близок к 1 по модулю, это говорит о высоком уровне связи между переменными. Например, когда переменная коррелирует сама с собой, коэффициент корреляции будет равен +1. Это указывает на прямо пропорциональную зависимость. Если значения переменной X упорядочить по возрастанию, а соответствующие им значения переменной Y – по убыванию, то коэффициент корреляции между X и Y будет равен -1. Такой коэффициент корреляции свидетельствует об обратной пропорциональной зависимости.

Формула для подсчета коэффициента корреляции имеет следующий вид:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{\sqrt{\sum (x_i - M_x)^2 \sum (y_i - M_y)^2}},$$

где x_i – значения, принимаемые переменной X ; y_i – значения, принимаемые переменной Y ; M_x – средняя по X ; M_y – средняя по Y .

Выборочные рассчитанные значения модулей коэффициентов корреляции представлены в табл. 3.

Таблица 3

Выборочные значения модулей коэффициентов корреляции

Номера спутников	1	8	17	26
1	1,0	0,98647545852077	0,99969232684640	0,98482950569361
8	0,98647545852077	1,0	0,98245104435400	0,9999522654286
17	0,999692326846407	0,98245104435400	1,0	0,9805910475390
26	0,98482950569361	0,99995226542863	0,9805910475390	1,0

В процессе изучения собранных данных была выявлена корреляционная связь между изменениями псевдодальностей до спутников. Иначе говоря, изменение расстояния между приём-

ником и одним спутником взаимосвязано с изменением дистанции между приёмником и другим спутником.

Чтобы убедиться в этом, были проведены дополнительные исследования. Их результаты также продемонстрировали наличие корреляции.

Стоит подчеркнуть, что с увеличением времени наблюдений эта связь становилась менее выраженной.

Основываясь на полученных данных, мы предположили, что существует определённая закономерность между изменениями расстояний до разных спутников.

Суть гипотезы такова: поскольку спутники движутся по орбитам с большим радиусом, можно допустить, что на коротком временном отрезке изменение расстояния от каждого спутника до наблюдателя будет иметь линейный закон. Это означает, что при изменении расстояния до одного спутника можно предсказать величину изменения расстояния до другого спутника. Для подтверждения этой гипотезы были построены графики ΔP для различных спутников (рис. 1).

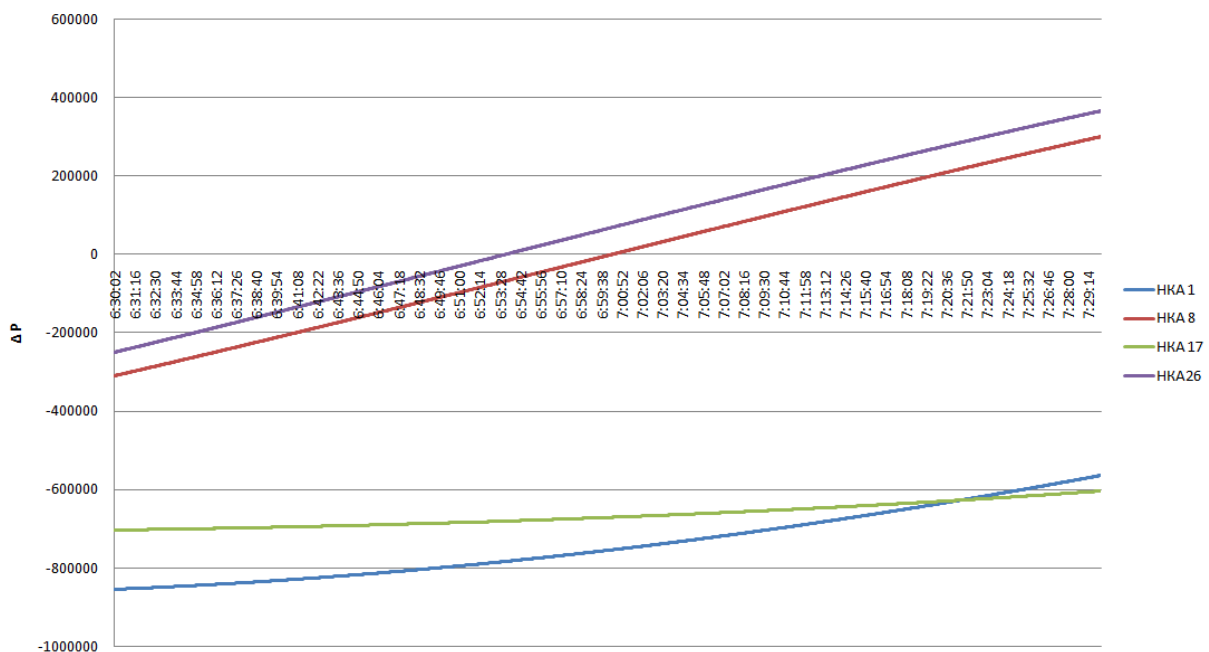


Рис. 1. Изменение ΔP в период времени от 06:30 до 07:30 для НКА номер 1, 8, 17, 26

Fig. 1. Change of ΔP in the time period from 06:30 to 07:30 for NSA number 1, 8, 17, 26

Способность прогнозировать изменения псевдодальностей позволит использовать спутники с кратковременными периодами потери информации для решения навигационной задачи.

На основе этой гипотезы был разработан непараметрический алгоритм восстановления данных при решении навигационной задачи.

Алгоритм восстановления навигационных параметров

Непараметрическая оценка функции регрессии

Предположим, что у нас есть набор статистически независимых наблюдений двух случайных величин $(u, x) = (u_1, x_1), \dots, (u_n, x_n)$, которые представляют собой пары значений. Эти случайные величины характеризуются неизвестной плотностью вероятности $P(u, x)$, причём $p(u) > 0 \forall u \in \Omega(u)$ [11]. Это означает, что в данной области существует ненулевая вероятность наблюдения значения u . Для аппроксимации неизвестных стохастических зависимостей между переменными x от u часто используется метод регрессии x по u , который позволяет оценить влияние изменения одной переменной на другую. Непараметрическая оценка этой зависимости имеет вид [12; 13]:

$$x_n = f_n(u) = \left(\sum_{i=1}^n \Phi \left(\frac{u - u_i}{C_n} \right) \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i \Phi \left(\frac{u - u_i}{C_n} \right) \right),$$

где Φ – ядерная функция; C_n – коэффициент размытости ядра.

Идея алгоритма основана на гипотезе, описанной выше.

Алгоритм содержит следующие шаги:

1. Сформировать набор наблюдений, который содержит изменения псевдодальностей наблюдаемых навигационных спутников. При первом решении навигационной задачи рассчитать зоны радиовидимости для всех наблюдаемых спутников.

2. Определить размер выборки, достаточный для построения непараметрической оценки функции регрессии [14; 15]. Размер выборки должен быть достаточно большим для надёжной оценки функции регрессии, но не слишком большим, чтобы сохранить корреляцию между параметрами.

3. При добавлении новых данных включить новые значения ΔP в выборку наблюдений. Если размер выборки превышает установленный на шаге 2, удалить из выборки наблюдений самое старое значение.

4. Если есть пропуск в измерении псевдодальности до спутника, действовать следующим образом.

Если в накопленной выборке есть информация о пропущенном спутнике и спутник должен быть виден согласно расчёту зоны радиовидимости, экстраполировать это изменение следующей формулой:

$$p_{k(n)} = p_{k(n-1)} + \Delta p, \Delta p = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta p_{ki} \prod_{j=1}^{k-1} \Phi \left(\frac{\Delta p_{ki} - \Delta p_{ji}}{c_{sj}} \right)}{\sum_{i=1}^{n-1} \prod_{j=1}^{k-1} \Phi \left(\frac{\Delta p_{ki} - \Delta p_{ji}}{c_{sj}} \right)},$$

где p_k – отсутствующий параметр в спутнике k ; n – количество отбираемых наблюдений; k – количество наблюдаемых спутников.

С помощью этого алгоритма можно восстановить параметры отсутствующего сигнала. Однако эксперименты показали, что чем дольше отсутствует сигнал, тем больше погрешность алгоритма.

Результат восстановления

Для оценки эффективности и точности работы алгоритма были использованы данные из табл. 2. В рамках исследования в эти данные были внесены случайные пропуски всем спутникам. Пропуски составили пять процентов от общего объёма выборки. При внесении пропуска по спутнику из выборки исключались измерения длительности от 3 до 15 мин.

Цель внесения пропусков – симулировать условия, в которых навигационный приемник теряет сигнал от некоторых навигационных спутников (например, в связи с высокой плотностью застройки). Это позволяет оценить способность алгоритма восстанавливать пропущенные значения и его эффективность в работе с неполными данными.

После внесения пропусков был применён разработанный алгоритм для восстановления пропущенных значений. Затем было проведено сравнение реальных данных и восстановленных. Этот шаг позволил оценить точность и надёжность алгоритма в процессе восстановления данных. Часть результатов сравнения отображены в табл. 4 (в качестве примера приведен 1 спутник).

Таблица 4

Результаты восстановления значений псевдодальностей для НКА 1

Дата/время	Реальное значение ΔP , мм (Спутник 1)	Восстановленное значение ΔP , мм (Спутник 1)	Разница между значениями, мм
2024-07-10 6:30:34	-852594	-852624,0	30,0
2024-07-10 6:30:48	-852011	-852044,0	33,0
2024-07-10 6:31:40	-850527	-850564,0	37,0
2024-07-10 6:31:59	-849770	-849793,0	23,0
2024-07-10 6:32:34	-848503	-848518,9999999999	15,99999999883585
2024-07-10 6:33:04	-847705	-847738,0	33,0
2024-07-10 6:35:49	-841668	-841675,0	7,0
2024-07-10 6:35:54	-841499	-841563,0	64,0
2024-07-10 6:36:05	-841126	-841177,0	51,0
2024-07-10 6:36:22	-840296	-840298,0	2,0
2024-07-10 6:37:01	-838586	-838607,0	21,0
2024-07-10 6:40:06	-830571	-830609,0	38,0

Заключение

В рамках данной работы был разработан алгоритм, основанный на непараметрической оценке функции регрессии, направленный на восстановление выборки наблюдений. Эксперимент проводился с целью восстановления псевдодальностей до навигационных спутников ГЛОНАСС в условиях ограничений: антенна находилась на крыше здания в городе с большими углами закрытия, приёмник и антенна не передвигались, прерывание сигнала было установлено только для одного спутника из всей выборки.

Результаты показали, что различие между реальными и восстановленными значениями псевдодальностей не превышало одного процента, что позволяет их использовать для решения навигационной задачи, хотя влияние на точность определения навигации всё равно было. Это подтверждает эффективность предложенного алгоритма в определённых условиях.

Дальнейшие исследования будут направлены на модификацию алгоритма для условий передвижного приёмника и большего количества пропусков значений спутниковых сигналов. Расширение возможностей алгоритма позволит повысить точность и надёжность навигационных систем.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 25-19-20070, <https://rscf.ru/project/25-19-20070/>.

Acknowledgments

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Krasnoyarsk Regional Foundation for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities No. 25-19-20070, <https://rscf.ru/project/25-19-20070/>.

Библиографические ссылки

1. Герц И. Ф., Шаров А. Ю. Сравнение глобальных спутниковых систем Глонасс и GPS // Материалы XVI Всеросс. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов: посвящается 90-летию Урал. гос. лесотехнич. ун-та (УЛТИ УГЛТА УГЛТУ). УГЛТУ, 2020. С. 193–195.
2. Батрагин О. Д., Ускова А. В., Котелевец А. Н. Глобальные навигационные спутниковые системы // Концепции устойчивого развития науки в современных условиях. 2022. С. 11–13.
3. Сатторов Ш. Я. Контроль движения автотранспортных средств на основе спутниковых технологий // Научный Фокус. 2023. Т. 1, № 6. С. 479–485.

4. Мусина А. В., Гринберг Г. М. Методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. 1. С. 634–636.
5. Абрамов С. А. Автономная посадка беспилотного летательного аппарата в условиях отсутствия глобальной навигационной системы связи : дис. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2024. 228 с.
6. Семенова Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. № 4 (27). С. 6–8.
7. Соловей Д. В., Кулаков И. А. Тенденции развития радионавигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Материалы XII Междунар. науч.-практич. конф. воен.-науч. об-ва «Актуальные вопросы развития авиационной военной науки и практики», посвященной 61-й годовщине полёта Ю. А. Гагарина в космос. Краснодар, 2022. С. 95–100.
8. Сорокин А. А., Бородянский И. М., Дагаев А. В. Сравнительный анализ методов восстановления пропущенных данных // Известия Юж. федер. ун-та. Технич. науки. 2020. № 4 (214). С. 93–107.
9. Злоба Е., Яцкие И. Статистические методы восстановления пропущенных данных // Computer Modelling & New Technologies. 2002. Т. 6, № 1. С. 51–61.
10. Шаныгин С. И. Корреляционный и регрессионный анализ. М. : Юрайт, 2024. 70 с.
11. Медведев А. В. Н-модели для безынерционных систем с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2012. № 5(45). С. 84–89.
12. Медведев А. В. Некоторые замечания к Н-моделям безынерционных процессов с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54). С. 24–34.
13. Медведев А. В., Ярещенко Д. И. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления многомерными безынерционными процессами // Вестник Томского гос. ун-та. Управлен. вычислит. техн. и ин-ка. 2020. № 53. С. 72–81.
14. Чжан Е. А., Кемпф Д. А. Модификация непараметрического алгоритма моделирования и дуального управления многомерными процессами в условиях неопределенности // Вестник Воронежского гос. технич. ун-та. 2020. Т. 16, № 3. С. 7–13.
15. Mikhov E. D. Piecewise approximation based on nonparametric modeling algorithms // Siberian Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 195–200.

References

1. Hertz I. F., Sharov A. Yu. [Comparison of global satellite systems Glonass and GPS] Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov: posvyashchaetsya 90-letiyu Ural'skogo gosudarstvennogo lesotekhnicheskogo universiteta (ULTI UGLTA UGLTU). UGLTU. 2020, P. 193–195 (In Russ.).
2. Batranin O. D., Uskova A. V., Kotelevets A. N. [Global navigation satellite systems]. Kontseptsii ustoychivogo razvitiya nauki v sovremennykh usloviyakh. 2022, P. 11–13 (In Russ.).
3. Sattorov Sh. Ya. [Control of motor vehicles movement on the basis of satellite technologies]. Nauchnyy Fokus. 2023, Vol. 1, No. 6, P. 479–485 (In Russ.).
4. Musina A. V., Greenberg G. M. [Methods of navigation of unmanned aerial vehicles]. Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики. 2022, Vol. 1, P. 634–636 (In Russ.).
5. Abramov S. A. Avtonomnaya posadka bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh otsutstviya global'noy navigatsionnoy sistemy svyazi. Dis. [Autonomous landing of an unmanned aerial vehicle in the absence of a global navigation communication system]. Krasnoyarsk, 2024, 64 p.
6. Semenova L. L. [Modern methods of navigation of unmanned aerial vehicles]. Nauka i obrazovanie segodnya. 2018, No. 4 (27), P. 6–8 (In Russ.).
7. Solovei D. V., Kulakov I. A. [Trends in the development of rado-navigation systems of unmanned aerial vehicles]. Materialy KhII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii voenno-nauchnogo obshchestva "Aktual'nye voprosy razvitiya aviatsionnoy voennoy nauki i praktiki", posvyashchennoy 61-y godovshchine poleta Yu. A. Gagarina v kosmos [Proceedings of the

XII International Scientific and Practical Conference of Military Scientific Society “Actual issues of development of aviation military science and practice”, dedicated to the 61st anniversary of Y. A. Gagarin's flight into space]. Krasnodar, 2022, P. 95–100 (In Russ.).

8. Sorokin A. A., Borodyansky I. M., Dagaev A. V. [Comparative analysis of missing data recovery methods]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020, No. 4 (214), P. 93–107 (In Russ.).

9. Zloba E., Yatskie I. [Statistical methods of missing data recovery]. *Computer Modelling & New Technologies*. 2002, Vol. 6, No. 1, P. 51–61 (In Russ.).

10. Shanygin S. I. *Korrelyatsionnyy i regressionnyy analiz* [Correlation and regression analysis]. Moscow, Jurayt Publ., 2024, 70 p.

11. Medvedev A. V. [H-models for the inertia-free systems with delay]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 5(45), P. 84–89 (In Russ.).

12. Medvedev A. V. [Some remarks to the H-model. V. Some remarks to the H-models of the inertia-free processes with delay]. *Vestnik of SibGAU*. 2014, No. 2(54), P. 24–34 (In Russ.).

13. Medvedev A. V., Yareschenko D. I. [Nonparametric algorithms of identification and control of multidimensional inertia-free processes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2020, No. 53, P. 72–81 (In Russ.).

14. Zhang E. A., Kempf D. A. [Modification of the nonparametric algorithm for modeling and dual control of multidimensional processes under uncertainty]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020, Vol. 16, No. 3, P. 7–13 (In Russ.).

15. Mikhov E. D. [Piecewise approximation based on nonparametric modeling algorithms]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 195–200 (In Russ.).

© Караванов А. В., Михов Е. Д., 2025

Караванов Александр Владимирович – преподаватель кафедры ОВП; Сибирский федеральный университет. E-mail: karavanov_92@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0000-4942-4080>.

Михов Евгений Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры РЭБ; Сибирский федеральный университет. E-mail: edmihov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9561-8596>.

Karavanov Alexander Vladimirovich – Lecturer; Siberian Federal University. E-mail: karavanov_92@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0000-4942-4080>.

Mihov Evgeny Dmitrievich – Cand. Sc., Associate Professor; Siberian Federal University. E-mail: edmihov@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9561-8596>.

Статья поступила в редакцию 10.03.2025; принята к публикации 19.05.2025; опубликована 30.06.2025

The article was submitted 10.03.2025; accepted for publication 19.05.2025; published 30.06.2025

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0
The article can be used under the Creative Commons Attribution 4.0 License