ИНТЕГРАЦИЯ АРХИТЕКТУР ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И SMART CITY ДЛЯ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

А.Г. Коробейников, *д-р техн. наук, профессор*
Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН)
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2025-10-2-60-69

Аннотация. *В условиях реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации и Стратегии развития Арктической зоны РФ особую актуальность приобретает задача обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации беспилотных транспортных систем (БТС) как в северных регионах, так и в урбанизированных пространствах, находящихся в высоких широтах. Современная концепция «Умный город» (Smart City), базирующаяся на технологиях искусственного интеллекта (ИИ), предполагает интеграцию информационных, коммуникационных и навигационных технологий для повышения эффективности городской инфраструктуры, включая БТС. Однако функционирование БТС в условиях умного города также подвержено влиянию внешних факторов, среди которых большее значение имеют геомагнитные возмущения (ГМВ), особенно в высоких широтах. Эти события особенно актуальны для высоких широт и ниже. Например, на широте Санкт-Петербурга (≈60° с.ш.) и севернее, ГМВ вызывают значительные ионосферные сцинтилляции и деградацию сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS).*

В работе предложен интегрированный подход к робастному управлению БТС, основанный на синергии современных архитектур ИИ: трансформеров для прогнозирования ионосферных параметров и мультиагентных систем для децентрализованного принятия решений.

Представленная гибридная система обеспечивает устойчивое позиционирование даже при полной или частичной потере GNSS-сигнала, что подтверждено результатами моделирования.

Разработанная технология соответствует приоритетам национальной стратегии развития Арктики и Smart City и открывает путь к безопасной эксплуатации БТС в условиях экстремальной космической погоды.

Ключевые слова: *GNSS, Smart City, беспилотные транспортные системы, геомагнитные возмущения, ионосферные сцинтилляции, искусственный интеллект, мультиагентные системы, робастное управление, трансформеры.*

В условиях реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации и Стратегии развития Арктической зоны РФ особую актуальность приобретает задача обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации беспилотных транспортных систем (БТС) как в северных регионах, так и в урбанизированных пространствах, находящихся в высоких широтах. Современная концепция Smart City «Умный город», в основе которой лежат технологии искусственного интеллекта (ИИ), предполагает интеграцию информационных, коммуникационных и навигационных технологий для повышения эффективности городской инфраструктуры, включая БТС. Однако функционирование БТС в условиях умного города также подвержено влиянию внешних факторов, среди которых большее значение имеют геомагнитные возмущения (ГМВ), особенно в высоких широтах, включая Санкт-Петербург [1]. Научные данные убедительно демонстрируют, что в наблюдаемый сейчас период 25-го солнечного цикла характеризуется значительным увеличением интенсивности и частоты ГМВ. Одним из наиболее наглядных проявлений этого является всё более частое появление северных сияний на широте Санкт-Петербурга (около

60° N) и даже южнее. Эти сияния вызваны смещением северного аврорального овала в сторону экватора, что происходит во время сильных магнитных бурь (значение глобального планетарного индекса геомагнитной активности $K_p \geq 7$). Видимость полярного сияния на широте Санкт-Петербурга служит прямым и убедительным индикатором того, что интенсивность ГМВ достигла уровня, критического для нормального функционирования технологических систем.

Прямое влияние ГМВ на БТС проявляется через нарушение функционирования глобальных навигационных спутниковых систем (Global Navigation Satellite System – GNSS), таких как ГЛОНАСС или GPS, действующих в RTK – режимах. RTK (Real-Time Kinematic) – это алгоритм (технология) для высокоточной навигации с использованием GNSS, результаты работы которого позволяет получать высокую точность в режиме реального времени. RTK работает на основе фазовых измерений несущей (а не только псевдодальностей). Проблема в том, что можно измерить только дробную часть фазы. Нужно ещё понять, сколько целых длин волн между антенной и спутником (integer ambiguity). Поэтому реализованы два режима: RTK fix – это когда алгоритм RTK успешно разрешил фазовую неоднозначность спутниковых сигналов, то есть точно определил целое количество волн от спутника до приёмника. В этом режиме ошибка может определяться сантиметрами; RTK float – это режим, когда неоднозначность ещё не полностью разрешена. Алгоритм использует только дробную часть фазы, без знания целого числа волн. Ошибка при этом в разы выше – обычно десятки сантиметров или даже метры.

Информация от – GNSS является основой для большинства алгоритмов автономного управления БТС. Но в высокоширотных регионах, особенно во время геомагнитных бурь, наблюдается значительное ухудшение качества навигационных сигналов из-за возмущений в ионосфере. Это связано с тем, что при возмущении высокоширотной, а также и полярной, ионосферы возникают эффекты, влияющие на распространение радиоволн в различных частотных диапазонах, в том числе на сигналы дециметрового диапазона, которые обычно используются в GNSS. Например, неоднородности в распределении плотности ионосферной плазмы могут привести к ионосферной сцинтилляции (ИС) – высокочастотным вариациям амплитуды и фазы сигнала GNSS. Большие ИС снижают качество сигнала, и, с большой вероятностью, приводят к его потере [2]. ИС наиболее выражены в высоких широтах [3], включая Санкт-Петербург. Экстремальные условия могут привести к полной или частичной неработоспособности GNSS на срок до нескольких дней.

На изменение полного электронного содержания (Total Electron Content – TEC) ионосферы в северных районах большое влияние оказывает северный авроральный овал (САО), представляющий из себя область повышенной ионизации, связанной с авроральными процессами. Преимуществом понятия «авроральный овал» заключается в объединении всех типов активных полярных сияний [4]. САО динамически смещается в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности. Это смещение приводит к локальным изменениям TEC и ИС, вызывая ошибки в позиционировании и даже полную потерю сигнала GNSS [5]. Например, в [6] показано, что наибольшее количество сбоев GNSS-сигнала во время геомагнитных бурь наблюдается вблизи САО.

При написании статьи в качестве программного инструментария использовался MATLAB, позволяющий решать задачи в различных предметных областях [7, 8].

Постановка задачи.

Традиционные подходы к управлению БТС, основанные на идеализированных моделях и предположении об отсутствии внешних помех, оказываются недостаточными для обеспечения устойчивого управления БТС в реальных условиях повышенных ГМВ. Ключевая научная проблема заключается не только в уязвимости БТС в высоких широтах, но и в недостаточной устойчивости управления БТС в Smart City при повышенных ГМВ. В умных городах плотность движения БТС (дроны доставки, беспилотные такси, инспекционные роботы) возрастает, что повышает требования к точности и надёжности позиционирования. Однако даже умеренные ГМВ ($Kp \geq 5$) могут вызывать ИС и задержки сигналов GNSS, приводя к ошибкам позиционирования до нескольких метров и даже к полной потере сигнала. В условиях высокой плотности трафика это создаёт критические

риски столкновений и сбоев в логистических цепочках. Существующие протоколы управления БТС в Smart City, как правило, не учитывают данные о космической погоде, что делает их неэффективными в условиях сильных ГМВ.

Необходим переход к робастному управлению, то есть устойчивому управлению в таких сложных условиях. В процессе этого перехода потребуется проведение работ по разработке и реализации методов управления, которые позволят БТС сохранять свою целевую функцию (навигацию, маневрирование, выполнение миссии) даже при частичном или полном отказе GNSS под действием дестабилизирующих факторов, связанных с ГМВ. Это потребует создания не просто адаптивных систем, а систем, способных к самовосстановлению и принятию решений в условиях высокой неопределенности и ограниченной информации.

Решение задачи робастного управления БТС в условиях сильных ГМВ затруднено без использования современных архитектур ИИ способных обрабатывать большие объемы данных и принимать адаптивные решения в реальном времени.

Необходимо использовать мультиагентные системы (Multi-agent system – MAS) и трансформеры (Transformer). Они представляют собой не просто набор инструментов, а смену парадигмы управления от централизованного к децентрализованному и от моделирования к обучению на данных.

MAS представляют собой совокупность взаимодействующих автономных агентов, способных совместно решать задачи, которые были бы трудноразрешимы для одного агента. В контексте устойчивого управления БТС это означает возможность создания группового интеллекта, где каждый элемент БТС работает как агент, обмениваясь информацией о своем состоянии, окружении и целях. Такая система демонстрирует высокую степень живучести и отказоустойчивости. Например, в случае потери связи с одним из агентов, другие смогут перенастроить свои маршруты и координировать действия для достижения общей цели.

Другим мощным инструментом, входящим в ИИ и который необходимо применяться, являются трансформеры – архитектура, адаптированная для анализа временных рядов и пространственных данных. Основное преимущество – механизм внимания (attention mechanism), позволяющий модели эффективно учитывать зависимости между всеми точками данных, а не только соседними, как в рекуррентных сетях (RNN). Этот механизм делает трансформеры чрезвычайно эффективными для прогнозирования сложных динамических процессов, что крайне важно для работы с данными космической погоды. В рамках работ необходима разработка специализированной трансформерной модели, способной прогнозировать параметры ионосферы в реальном времени. Трансформеры являются наиболее перспективным инструментом для создания "умного" фильтра, который сможет корректировать данные от сенсоров БТС, компенсируя искажения, вызванные ГМВ, и предоставляя робастному контроллеру надежную информацию о текущем состоянии системы.

Таким образом, объединение мультиагентных систем и трансформеров в единой архитектуре для решения задачи робастного управления БТС в условиях сильных ГМВ представляет собой перспективный подход. Трансформерная модель будет служить «чувствительным органом», прогнозирующим и корректирующим параметры ионосферы, тогда как MAS станет «нервной и мышечной системой», координирующей действия группы БТС и реализующей робастные алгоритмы управления. Такая гибридная система позволит не только адаптироваться к известным возмущениям, но и заранее готовиться к ним, прогнозируя их влияние и выбирая оптимальную стратегию поведения.

Подходы к решению

Предлагаемый подход предлагает комплексное решение проблемы робастного управления БТС в условиях ГМВ, основанное на трех взаимосвязанных компонентах: предиктивном прогнозировании космической погоды, формировании робастной оценки состояния системы и разработке адаптивных алгоритмов управления. Этот подход отличается от существующих тем, что он не пытается изолированно исправить последствия ГМВ, а создает самоорганизующуюся, предиктивно-адаптивную систему, способную к устойчивой работе в изменяющихся условиях.

Первый компонент – прогнозирование ионосферных возмущений. Ключевой научный вклад проекта заключается в разработке

специализированной архитектуры на основе трансформеров, которая будет обучаться на многолетних данных о солнечной и геомагнитной активности для точного прогнозирования параметров ионосферы в реальном времени. Эта модель, аналогичная моделям прогнозирования TEC, будет учитывать не только геомагнитные индексы, но и другие факторы, такие как плотность электронов и временные задержки в реакции ионосферы на солнечные события. Цель – создание предиктивного инструмента, который будет выдавать опережающие прогнозы ионосферных аномалий в зоне действия БТС. Такой подход обеспечивает переход от реактивного управления к проактивному, позволяя системе заранее готовиться к ГМВ, например, переключаясь на резервные источники навигации или меняя маршрут для минимизации влияния ГМВ.

Второй компонент – формирование робастной оценки состояния. Данные с бортовых сенсоров БТС (акселерометры, гироскопы, магнитометры) будут поступать на вход этого блока. Здесь применяется другой подход – использование MAS. Каждый БТС рассматривается как агент, который не только собирает данные со своего собственного оборудования, но и получает информацию от соседних агентов в группе. Это позволяет создать распределенную систему мониторинга, где агенты совместно проверяют и корректируют друг друга. Если один БТС фиксирует аномальное ГМВ, а другие его не подтверждают, система может сделать вывод, что это шум или локальная помеха, а не реальное событие. Такой коллективный взгляд на данные значительно повышает их надежность. Кроме того, агенты могут использовать информацию от наземных станций мониторинга, если они находятся в радиусе действия. Этот блок будет выполнять функцию «умного» фильтра, который на основе прогнозов от трансформерной модели и данных от сенсоров формирует наиболее точную и достоверную картину текущего состояния системы и внешней среды.

Третий компонент – разработка робастного контроллера. На основе выходных данных от второго компонента (робастной оценки состояния) и цели миссии (заданная траектория, точка прибытия) будет работать контроллер, основанный на современных методах робастного управления. Этот контроллер должен быть способен эффективно управлять БТС даже при наличии значительных ошибок в оценке состояния, вызванных ГМВ. Для этого могут быть использованы различные подходы, такие как H∞-синтез, сложные регуляторы, двухшаговый фильтр Калмана, или алгоритмы машинного обучения, обученные на данных, имитирующих работу в условиях ГМВ. Мультиагентный подход здесь также играет важную роль: контроллер может управлять не только отдельным БТС, но и всей группой в целом, обеспечивая согласованное движение и выполнение коллективных задач. Если один из БТС теряет связь или его сенсоры выходят из строя, другие агенты могут взять на себя часть его функций, обеспечивая общую целостность и завершение миссии. Это обеспечивает высокую степень отказоустойчивости.

Базовый математический аппарат применяемый при моделировании

Моделирование электронной концентрации с учетом САО

Для сложных условий в высоких широтах ($\approx 60 \div 80^0$), например, магнитные бури или смещение САО, распределение TEC в ионосфере становится значительно более сложным из-за динамических процессов, включая усиление ионизации, горизонтальные градиенты и возмущения, вызванные солнечным ветром и магнитосферными взаимодействиями. В этих случаях эмпирическую зависимость распределения электронной концентрации в ионосфере можно описывать различными формулами. В ходе работы над данной статьей была выбрана модель OVATION-Prime [9]. В 2020 году NOAA SWPC внедрила в эксплуатацию новую версию модели OVATION Prime. Эта версия получила название OVATION 2020 [10].

Расчёт ионосферных задержек

Принято считать, что величина задержки сигнала GNSS зависит в основном лишь от количества свободных электронов на его пути. Поэтому интегральная формула фазовой задержки сигнала GNSS определяется так [11]:

$$\Delta\Phi = -\frac{40.3}{f^2}\cdot STEC,$$

где $STEC = \int_{l_0}^{l_{end}} N_e(l)\,dl$ – Slant TEC, т.е. наклонный TEC для произвольного пути L с началом в точке l_0 и окончанием в точке l_{end},

f – частота сигнала GNSS,
dl – элемент пути вдоль трассы сигнала GNSS.

Двухшаговый расширенный фильтр Калмана

Двухшаговый расширенный фильтр Калмана (ДРФК) достаточно широко применяется в областях, где необходимо оценивать состояние системы при наличии меняющихся смещений (bias) сенсоров или неизвестных входных воздействиях. Например, в навигации для оценки положения и скорости транспортного средства с учетом смещений, вычисляемыми автономными инерциальными навигационными системами (ИНС) или погрешностями GNSS-приемников.

Вместо того чтобы оценивать все параметры в одном большом векторе состояния, ДРФК разбивает процесс на два этапа. Это позволяет снизить вычислительную сложность и повысить устойчивость алгоритма. На первом этапе используется обычный фильтр Калмана, при помощи которого вычисляется так называемая «бессмещенная» (bias-free) оценка состояния, то есть предполагается, что смещения и все параметры вектора состояния известны (хотя на самом деле они неизвестны). Второй этап (фильтр оценки смещения) использует результаты первого этапа для оценки неизвестных смещений или других параметров. Он работает параллельно с первым фильтром, используя остатки (разницу между реальными и прогнозируемыми измерениями) для корректировки оценки смещения.

Полученные оценки с обоих этапов затем объединяются для получения окончательной, более точной оценки состояния системы. Реализация ДРФК произведена в MATLAB на основе рекомендаций из [12].

RTS – сглаживание

RTS-сглаживание (Rauch–Tung–Striebel smoothing) – это метод постобработки траекторий, который используется вместе с фильтром Калмана. Фильтр Калмана работает онлайн, а RTS-сглаживание – это оффлайн алгоритм, который запускается после прохождения фильтра Калмана: – сначала производится прогон вперёд (forward pass) – обычный Калман. Затем прогон назад (backward pass) – уточнение всех прошлых состояний с использованием информации о будущих измерениях. В результате: – точность выше (ошибка уменьшается, иногда на порядок); все состояния (координаты, скорости и т. п.) оцениваются «с учётом будущего». То есть, если есть сохраненные данные GNSS/INS с БТС, то после моделирования можно прогнать RTS-сглаживание и получить ошибки в 5-10 раз меньше, чем в «сыром» ДРФК–фильтре.

RTK – режимы

RTK (Real-Time Kinematic) – это алгоритм (технология) для высокоточной навигации с использованием GNSS, результаты работы которого позволяет получать высокую точность в режиме реального времени. RTK работает на основе фазовых измерений несущей (а не только псевдодальностей). Проблема в том, что мы можем измерить только дробную часть фазы. Нужно ещё понять, сколько целых длин волн между антенной и спутником (integer ambiguity). Поэтому реализованы два режима: RTK fix – это когда алгоритм RTK успешно разрешил фазовую неоднозначность спутниковых сигналов, то есть точно определил целое количество волн от спутника до приёмника. В этом режиме ошибка может определяться сантиметрами; RTK float – это режим, когда неоднозначность ещё не полностью разрешена. Алгоритм использует только дробную часть фазы, без знания целого числа волн. Ошибка при этом в разы выше – обычно десятки сантиметров или даже метры.

Формула задержки времени фиксации

$$t_{fix_delay} = t_0 \left(1 + \alpha K_p\right)$$

где: t_0 – базовое время фиксации (например, 10 секунд);

α – коэффициент влияния бури (при моделировании было задано $\alpha = 4$);

K_p – индексе геомагнитной активности.

Моделирование

Моделирование режимов RTK fix и RTK float при помощи Monte-Carlo в данной работе применялось для разных уровней шума в GNSS в зависимости от того, решена ли фазовая неоднозначность. Схема применения RTK следующая:

1. В начале (и при сильных помехах) система находится в RTK float.

2. Через время фиксации t_{fix_delay} (секунд) приёмник может перейти в RTK fix, если условия позволяют.

3. При большом значении K_p время фиксации увеличивается, а при очень высоком – приёмник вообще может так и остаться в float.

4. Если GNSS «падает» (имитация потери сигнала), приёмник возвращается в float и снова ждёт фиксацию.

Можно отметить, что если буря очень сильная (например, $K_p \geq 8$), то велика вероятность, что RTK fix вообще не будет включен.

Для повышения статистической достоверности задавалось M = 200 прогонов Монте-Карло.

Результаты моделирования

На рисунке 1 представлена часть траектории БТС (≈ 8 м) при $K_p = 7$.

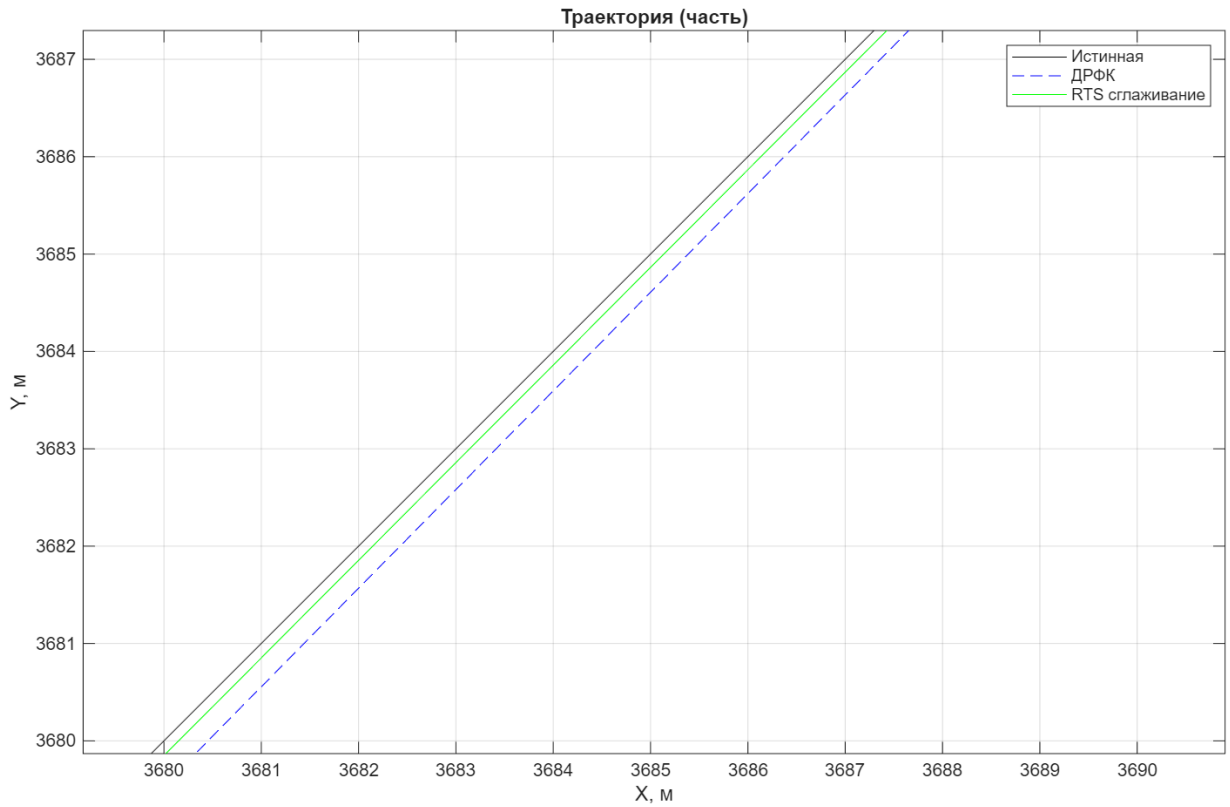

Рис. 1. Часть траектории БТС

На рисунке 2 представлены ошибки, возникающие в ходе процесса прохождения БТС всей траектории при $K_p = 7$.

На рисунках 3-5 представлены ошибки, получаемые во время работы в режимах RTK при $K_p = 5,7,9$.

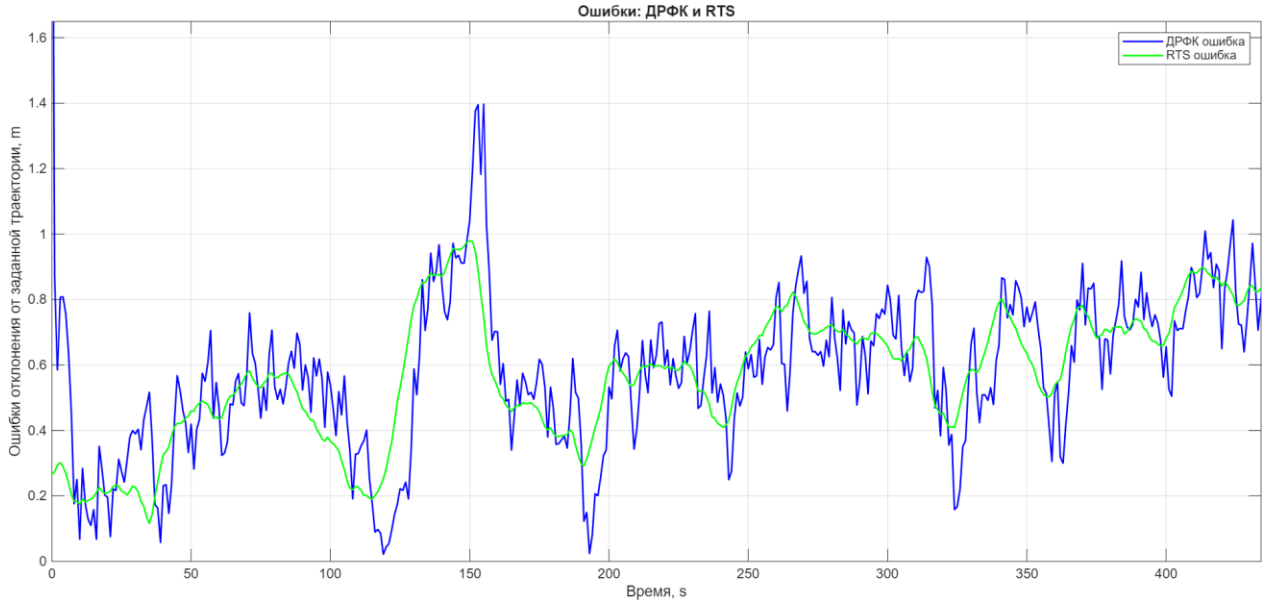

Рис. 2. Ошибки, возникающие при RTS-сглаживании и ДРФК

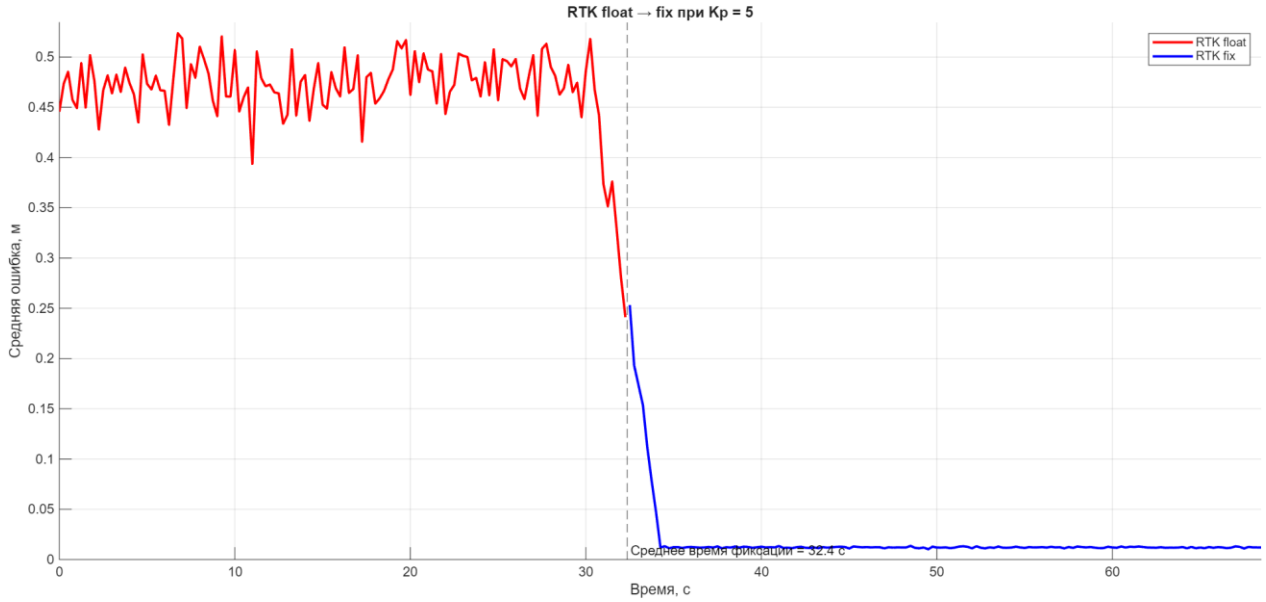

Рис. 3. Ошибки при работе в режимах RTK fix и RTK float при $K_p = 5$

Обсуждение результатов моделирования

На рисунке 1 хорошо видно, что траектория, полученная при RTS-сглаживании, наиболее близка к истинной траектории, что полностью согласуется с теоретическими положениями RTS-сглаживания. Это подтверждается также ошибками, представленными на рисунке 2, где видно, что ошибки, возникающие при RTS-сглаживании, меньше, чем при ДРФК.

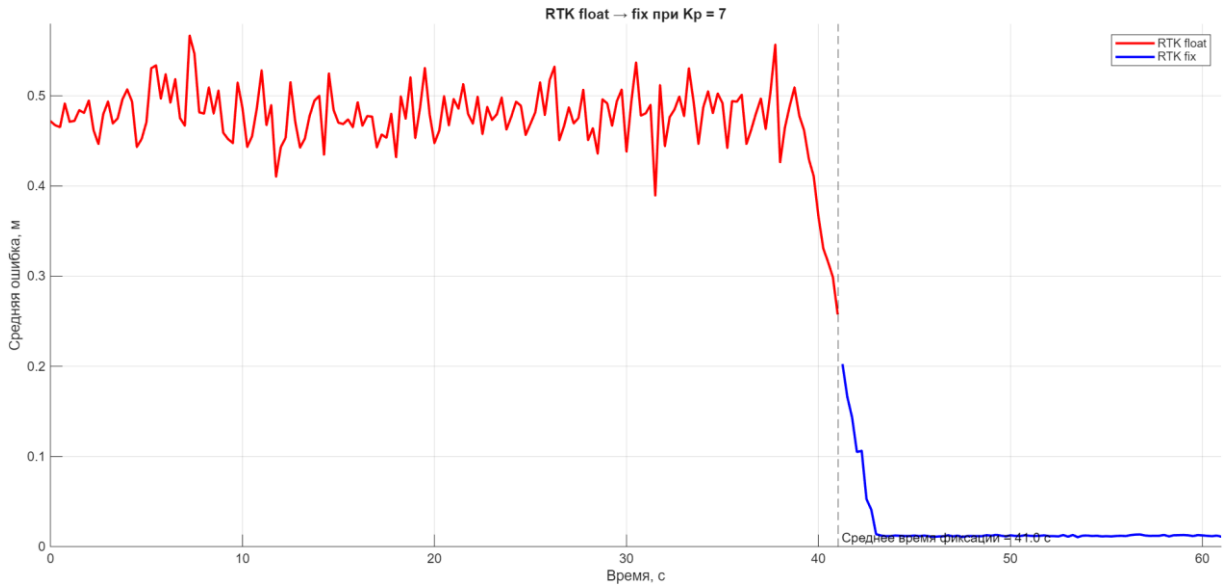

Рис. 4. Ошибки при работе в режимах RTK fix и RTK float при $K_p = 7$

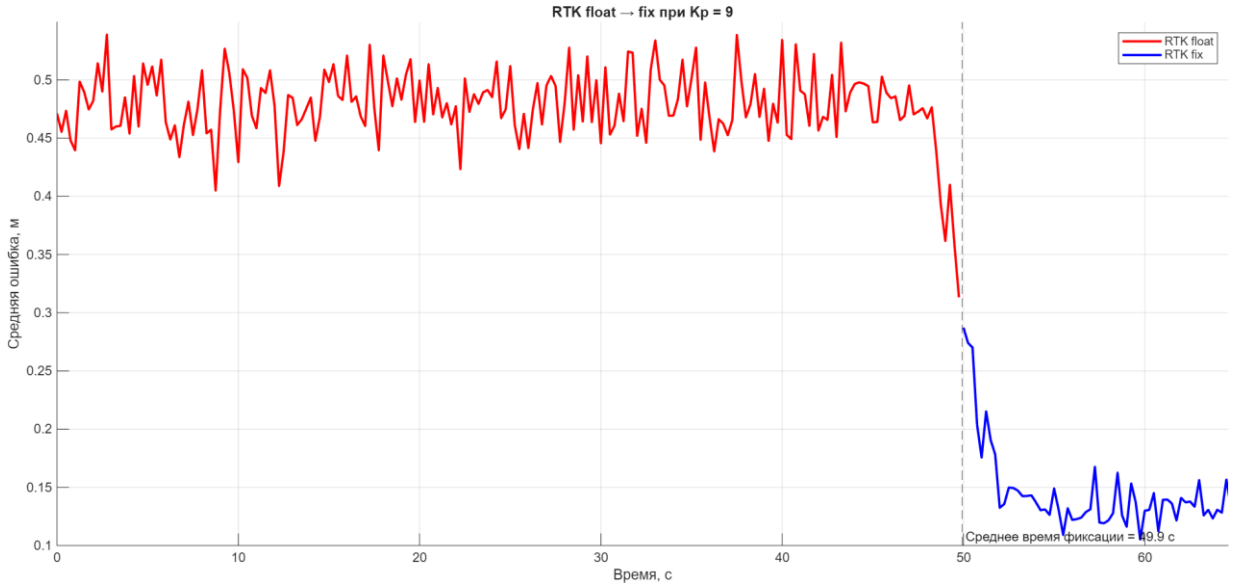

Рис. 5. Ошибки при работе в режимах RTK fix и RTK float при $K_p = 9$

На рисунках 3-5 видно, что работа в режиме RTK float сопровождается большими ошибками, чем при работе в режиме RTK fix. Среднеквадратичные ошибки (RMSE) и время фиксации представлены в таблице.

На графиках видно, что в момент перехода в режим RTK fix происходит резкое падение ошибки.

Таблица. Полученные RMSE и время фиксации при различных $K_p = 5,7,9$

K_p	5	7	9
Средняя задержка фиксации (с)	32.4	41.0	49.9
RMSE RTK float (м)	0.593	0.799	1.602
RMSE RTK fix (м)	0.048	0.163	0.391

Заключение

Результаты моделирования показывают, что даже во время сильных геомагнитных возмущений ($K_p = 9$ – магнитная буря) RMSE RTK fix позиционирования не хуже 40 сантиметров. Такой результат, во многих случаях, позволяет не прекращать процесс движения БТС, что положительно сказывается на эффективности применения БТС.

При практическом применении представленного подхода, для большей достоверности получаемых результатов в режиме реального времени, при решении задачи повышения устойчивости управления БТС предлагается:

– коррекция ТЕС в реальном времени на базе ионосферных карт;

– использование данных с наземных опорных станций;

– интегрировать различные навигационные технологии (гибридная навигация).

Реализация этих предложений, в сочетании с RTS, даст заметное улучшение повышение устойчивости управления БТС в северных районах во время повышенных ГМВ.

Разработанная гибридная архитектура на основе трансформеров и мультиагентных систем обеспечивает заданный уровень робастности БТС в условиях ГИВ. Подход позволяет не только компенсировать сбои GNSS, но и прогнозировать их, обеспечивая безопасную и надёжную эксплуатацию беспилотного транспорта в Smart City и Арктике. Результаты работы открывают путь к созданию «живучих» автономных систем, устойчивых к экстремальным геофизическим условиям.

Библиографический список

1. Korobeynikov A. Integration of Geomagnetic Activity Monitoring Data Processing Methods and Smart City Technologies to Ensure the Required Safety of Unmanned Transport Infrastructure Objects // International Scientific and Practical Conference "Smart Cities and Sustainable Regional Development" (15 September 2025). – 2025. – P. 239-243. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ssdl.online/smartgreens2025.

2. Белаховский В.Б., Будников П.А., Калишин А.С., Пильгаев С.В., Ролдугин А.В. Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников по данным наблюдений на Кольском полуострове. Солнечно-земная физика. – 2023. – Т. 9, № 3. – С. 58-72. – DOI: 10.12737/szf-93202307.

3. Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. GPS and ionospheric scintillations // Space Weather. – 2007. – Vol. 5. – P. S0900.

4. Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 23-35. – DOI 10.12737/5673.

5. Шагимуратов И.И., Филатов М.В., Ефишов И.И., Флуктуации полного электронного содержания и ошибки GPS-позиционирования, обусловленные полярными сияниями во время аврорального возмущения 27 сентября 2019 г. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 3. – С. 433-439. – DOI: 10.31857/S036767652103025X.

6. Astafyeva E., Yasyukevich Yu., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. – 2014. – Vol. 12, Iss. 7. – P. 508-525. – DOI: 10.1002/2014SW001072.

7. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г., Величко Е.Н., Непомнящая Э.К., Розов С.В. Синтез бинарных матриц для формирования сигналов широкополосной связи // Радиотехника. – 2015. – № 9. – С. 51-58.

8. Коробейников А.Г., Кудрин П.А., Сидоркина И.Г. Алгоритм распознавания трехмерных изображений с высокой детализацией // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 2. – С. 91-98.

9. Николаев А.В., Долгачева С.А., Черняева С.А. О точности определяемых видимых границ полярных сияний в модели OVATION-Prime (PC) // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 37, № 4. – С. 171-182. – DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-171-182.

10. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Krasnoperov R.I., Vorobeva G.R., Lorentzen D.A. (2020), Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the «virtual globe» technology // *Russ. J. Earth Sci., 20*, ES6001, DOI: 10.2205/2020ES000721.

11. Klobuchar J.A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. – 1987. – Vol. 23, IEEE. – Pp. 325-331.

12. Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. 4 revised editions. – Wiley, 2015. – 640 p. – ISBN: 9781118851210.

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ARCHITECTURES AND SMART CITY FOR ROBUST CONTROL OF UNMANNED TRANSPORTATION SYSTEMS IN HIGH LATITUDES UNDER STRONG GEOMAGNETIC DISTURBANCES

A.G. Korobeynikov, *Doctor of Technical Sciences, Professor*
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial (SPbF IZMIRAN)
(Russia, St. Petersburg)

Abstract. *In the context of implementing the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation and the Strategy for the Development of the Russian Arctic Zone, ensuring reliable and safe operation of unmanned transportation systems (UTS) becomes especially critical – both in northern regions and in urbanized areas located at high latitudes. The modern "Smart City" concept, grounded in artificial intelligence (AI) technologies, envisions the integration of information, communication, and navigation technologies to enhance the efficiency of urban infrastructure, including UTS. However, UTS operation within a Smart City environment remains vulnerable to external factors, among which geomagnetic disturbances (GMD) are particularly significant – especially at high latitudes. Such disturbances are especially relevant at latitudes of approximately 60° N (e.g., Saint Petersburg) and higher, where GMD induce substantial ionospheric scintillations and degradation of Global Navigation Satellite System (GNSS) signals.*

This paper proposes an integrated approach to robust UTS control based on the synergy of modern AI architectures: transformers for forecasting ionospheric parameters and multi-agent systems for decentralized decision-making. The proposed hybrid system ensures resilient positioning even under complete or partial GNSS signal loss, as confirmed by simulation results.

The developed technology aligns with the priorities of Russia's national Arctic and Smart City development strategies and paves the way toward safe UTS operation under extreme space weather conditions.

Keywords: *GNSS, Smart City, unmanned transportation systems, geomagnetic disturbances, ionospheric scintillations, artificial intelligence, multi-agent systems, robust control, transformers.*