

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АБСОЛЮТНОЙ ВИЗУАЛЬНО-ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

П.А. Лазарева, А.И. Маликов, Г.Л. Дегтярев, Р.Т. Маннанов

Рассмотрены подходы к навигации беспилотных воздушных судов (БВС) при отсутствии спутниковых сигналов, использующие алгоритмы компьютерного зрения. Проведен сравнительный анализ методов абсолютной навигации по предварительно загруженным спутниковым картам. Предложен алгоритм сезонно инвариантной визуально-инерциальной навигации на основе сопоставления ключевых точек изображений с использованием алгоритма SIFT с коррекцией по сигналам инерциальной навигационной системы, оптимизированный в вычислительном плане для использования в реальном времени. Приведены результаты работы алгоритма с использованием реальных данных полета БВС в сравнении с эталонными данными спутниковой навигационной системы.

Ключевые слова: визуально-инерциальная навигация, визуально-инерциальная одометрия, беспилотное воздушное судно, автономная навигация, опорная карта

Введение

В последние годы наблюдается растущий спрос на использование беспилотных авиационных систем (БАС) в различных областях, начиная от сельского хозяйства и мониторинга труднодоступных районов, заканчивая применением в условиях боевых действий [1]. Это обусловлено не только относительной дешевизной конструкций, но и способностью выполнять задачи в условиях повышенного риска. Однако эффективность применения БАС во многом зависит от точности и надежности навигационной системы.

До настоящего времени глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) считались надежным способом определения координат беспилотных воздушных судов (БВС). Однако на практике могут возникать ситуации, когда спутниковые сигналы подвергаются искажениям или вообще отсутствуют. К естественным искажениям относятся ошибки многолучевости, вызванной многократными переотражениями спутникового сигнала от разных поверхностей и дифракцией на небольших объектах, сопоставимых по размерам с длиной волны. Помехи от мощных источников радиоизлучений (локаторов, теле- и радиопередающих станций) также ухудшают результаты спутниковых измерений координат. К намеренным искажениям сигналов

ГНСС относятся подавление сигнала (джамминг) и спуфинг-атаки, когда на приемник поступает более мощный сигнал, имитирующий ГНСС и передающий неверные навигационные параметры.

Для надежной и точной навигации БВС необходимо обеспечивать их способность к автономной навигации, т.е. без использования внешних сигналов. Инерциальные навигационные системы (ИНС), хотя и обладают свойством автономности, подвержены неограниченному накоплению методической ошибки.

Для повышения точности автономной навигации в последние годы активно разрабатываются методы на базе систем технического зрения. Наибольшее распространение получили методы визуально-инерциальной навигации (ВИН), которая представляет собой подход, объединяющий данные от ИНС и визуальных сенсоров (камер) для точной оценки положения, ориентации и скорости движущегося объекта. Основное преимущество ВИН заключается в компенсации недостатков каждого типа датчиков: ИНС обеспечивает высокую частоту обновления данных и краткосрочную стабильность измерений, но страдают от накопления ошибок (дрейфа), тогда как визуальные данные предоставляют долгосрочную стабильность, но могут быть ненадежны при быстром движении или в сценах с низкой текстурностью.

1. Существующие подходы к визуально-инерциальной навигации

Методы визуально-инерциальной навигации можно условно разделить на две группы: относительную и абсолютную. Методы относительной навигации включают одновременную локализацию и картографирование (SLAM, simultaneous localization and mapping) и визуальную одометрию. В первом случае одновременно строится карта окружающей среды и определяется текущее положение движущегося объекта на этой карте. В случае визуальной одометрии оценивается изменение положения объекта между двумя последовательными кадрами, полученными с бортовой камеры. Методы абсолютной навигации сравнивают изображения, полученные с бортовой камеры, с предварительно загруженной спутниковой картой

местности для определения координат БВС.

Методы относительной навигации не требуют наличия карты местности, работоспособны в динамически меняющейся обстановке, однако накапливают ошибки при длительных миссиях, что снижает их точность в глобальном масштабе. В свою очередь, методы абсолютной навигации нивелируют дрейф оценок координат и дают детерминированный диапазон погрешностей. Основные сложности абсолютной навигации связаны с большим количеством требуемых данных и сложностью сопоставления изображений, полученных из разных источников. Для получения изображений с камеры и со спутника используются разные сенсоры, изображения часто бывают получены в разные сезоны, при разной освещенности, ориентации, с разным разрешением, что усложняет сопоставление изображений [2]. Однако абсолютная визуальная навигация превосходит относительную по точности, т.к. использует эталонную информацию для определения местоположения БВС. Доступность спутниковых снимков высокого разрешения для всей земной поверхности послужило их активному использованию для визуальной навигации.

2. Методы абсолютной навигации

Методы абсолютной навигации можно разделить на:

- корреляционно-экстремальные,
- использующие ключевые точки,
- нейросетевые.

Корреляционно-экстремальные алгоритмы позволяют определять взаимную ориентацию и положение эталонного изображения и получаемого с бортовой камеры путем максимизации корреляционной функции между изображениями. Корреляционный подход к сопоставлению изображений в последнее время применяется всё реже.

Алгоритмы, относящиеся ко второй группе, извлекают ключевые точки и их дескрипторы из изображения эталонной карты и получаемого с камеры БВС, производят их предварительную обработку, а затем путем сопоставления ключевых точек определяют матрицы гомографии и, соответственно,

положение БВС в пространстве. Ключевые точки – это особые точки на изображении, окрестность которых отличается от всех других точек. Это могут быть углы, края объектов, области с большим градиентом яркости. Подобные алгоритмы оперируют меньшим количеством информации для сопоставления изображений, чем первая группа методов. Для построения детекторов и сопоставления изображений могут использоваться как классические, так и нейросетевые алгоритмы [3].

В алгоритмах третьей группы используется семантическая сегментация изображений с помощью нейронных сетей, которые предварительно обучаются на эталонных изображениях местности. В качестве объектов для распознавания чаще всего используется дорожная и речная сети, лесополосы, а также здания и постройки. Однако данный подход может испытывать затруднения при полете над монотонной местностью. Кроме того, он требует значительных вычислительных ресурсов и не гарантирует работу в реальном времени.

Среди перечисленных подходов методы, основанные на использовании ключевых точек, дают лучший компромисс между точностью, скоростью и устойчивостью, что делает их оптимальными для абсолютной визуальной навигации БВС в неизвестной или изменяющейся среде. Корреляционные методы проигрывают из-за высокой вычислительной нагрузки и зависимости от условий съёмки, а семантическая сегментация — из-за требований к обучению и недостаточной точности позиционирования [4].

Отдельной проблемой использования алгоритмов абсолютной навигации с использованием опорной карты являются сезонные изменения земной поверхности, которые в средних широтах весьма значительны. Здесь могут быть использованы два подхода: использование актуальных для рассматриваемого времени года спутниковых карт, которые регулярно обновляются и находятся в свободном доступе, или разработка алгоритмов, инвариантных к сезонным изменениям. Для второго подхода характерно использование алгоритмов глубокого обучения на данных спутниковых

снимков при разных сезонах [5], однако они весьма требовательны к вычислительным ресурсам и не всегда можно гарантировать их работоспособность в реальном времени.

3. Разработка алгоритма абсолютной визуально-инерциальной навигации на основе ключевых точек

В данной работе предлагается метод сезонно-инвариантной абсолютной визуально-инерциальной навигации, который заключается в следующем. Для сопоставления признаков используется несколько спутниковых геопривязанных карт для разных сезонов (для средней полосы необходимы карты, соответствующие 4 сезонам). Для карты каждого сезона, соответствующей области эксплуатации заданного размера (например, 100 на 100 км) предварительно находятся все ключевые точки, для которых сохраняются SIFT дескрипторы.

Можно либо объединять признаки всех сезонов в один пакет, либо хранить их отдельно с отметкой сезона. В данной реализации ключевые точки из всех четырёх сезонов объединяются в один массив (с возможным дублированием, если одна точка была найдена во всех сезонах). Это означает, что база содержит «летние» признаки полей, «зимние» признаки заснеженных участков, весенние и осенние варианты. Когда БВС делает снимок в любой сезон, всегда найдутся признаки с похожим состоянием. Таким образом, даже если в кадре присутствует много заснеженных участков, в базе будут соответствующие дескрипторы, и поиск совпадений будет успешен.

Кроме того, снимки разных сезонов для одной и той же рассматриваемой области выравниваются между собой. Например, если пиксели сезонных снимков немного смещены, выполняется аффинное преобразование, чтобы совпали ключевые элементы рельефа. Это нужно, чтобы соответствующие географические точки в разных сезонах попадали в одинаковые пиксельные координаты области.

По сравнению с односезонной выборкой такой метод дает более высокую устойчивость: вероятность найти истинные совпадения существенно

повышается. Важно отметить, что используются не произвольные снимки с разными сезонными условиями, а производится их геопривязка – поэтому один и тот же участок в разные сезоны остаётся в рамках одной области, и SIFT-ключевые точки сопоставимы по координатам. Это увеличивает общее количество признаков, что помогает искать соответствия при любых погодно-сезонных условиях.

В результате применение мультисезонных признаков повышает устойчивость к изменчивости среды. Система автоматически учитывает сезон и погодные эффекты, сравнивая кадры БВС с наиболее близкими по сезону условиями. Это особенно важно для длительной работы автономных систем, которые должны корректно локализоваться как летом, так и зимой, без необходимости ручной перенастройки данных.

При выборе алгоритма детектора и дескриптора ключевых точек для сопоставления изображений со спутниковой картой, нужно оценивать чувствительность к изменениям яркости, масштабу, повороту изображений, а также устойчивость к шумам и дисторсии камер. Согласно сравнительному анализу [6], алгоритм SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [7] показывает лучшие результаты по количеству и точности найденных соответствий в различных сценариях, хотя и уступает в скорости. Он инвариантен к аффинным искажениям, поворотам, вариациям освещенности и точки обзора. Это делает его особенно подходящим для задач абсолютной навигации с использованием спутниковой карты и изображений с бортовой камеры.

Для каждого SIFT дескриптора, полученного с изображения камеры БВС, производится поиск наиболее подходящих соответствий в сохраненной всесезонной базе дескрипторов спутниковых карт методом k -ближайших соседей (k -NN).

Для выделения корректных пар соответствий и устранения выбросов используется метод RANSAC (Random Sample Consensus) [8]. Цель — найти гомографию H , которая описывает геометрическое соответствие между изображениями, устраняя ошибочные соответствия (выбросы).

Для повышения надежности нахождения гомографии, предлагается ввести дополнительные условия проверки полученной матрицы на корректность: выпуклость спроецированного четырехугольника и допустимая площадь с учетом известной высоты полета.

Для вычисления площади необходимо:

1. применить гомографию H к угловым точкам изображения камеры P_1, P_2, P_3, P_4 , чтобы получить соответствующие пиксельные координаты точек на спутниковой карте $x_m^{(Pi)}$, $i = 1, 2, 3, 4$;
2. применить аффинное преобразование к точкам $x_m^{(Pi)}$, чтобы получить координаты точек в мировой системе координат $x_w^{(Pi)}$, $i = 1, 2, 3, 4$;
3. вычислить площадь S четырехугольника, образованного точками с координатами $x_w^{(Pi)}$, по формуле Гаусса.

Максимальная площадь проекции четырехугольника $S_{\max}$ достигается, когда камера направлена перпендикулярно вниз. При выполнении условий $S \leq S_{\max}$ и выпуклости четырехугольника гомография считается корректной. На рис. 1 показан пример такого четырёхугольника.



Рис. 1 Построение перспективной проекции изображения с камеры на спутниковый снимок в виде четырехугольной рамки

Местоположение БВС в географических координатах вычисляется как проекция центра изображения с камеры на земную поверхность. Это

справедливо для нулевого отклонения по крену и тангажу. Однако из-за возможного изменения ориентации БВС возникает погрешность, требующая корректировки координат. Для устранения этой ошибки используются измеренные с помощью ИНС значения углов ориентации (φ, θ, ψ) , а также истинная высота полета h .

Сначала вычисляются горизонтальные смещения, вызванные креном и тангажом, затем эти смещения проецируются на северную и восточную составляющие с учётом курса. Для преобразования смещений в метрах в изменения широты и долготы используется приближенная модель, где 1 градус широты соответствует примерно 111320 метрам (длина дуги меридиана). Для вычисления долготы учитывается широта ϕ в радианах, т.к. длина дуги параллели зависит от косинуса широты:

$$\Delta_{\text{lat}} = \frac{\Delta_{\text{north}}}{111320},$$
$$\Delta_{\text{lon}} = \frac{\Delta_{\text{east}}}{111320 \cdot \cos(\phi)}.$$

Скорректированные координаты, которые являются искомым результатом, вычисляются путем добавления полученных изменений к исходным значениям широты и долготы:

$$\phi_{\text{corr}} = \phi + \Delta_{\text{lat}},$$
$$\lambda_{\text{corr}} = \lambda + \Delta_{\text{lon}}.$$

Не смотря на использование упрощенной модели Земли, данный метод коррекции координат подходит для использования в контексте рассматриваемой задачи, т.к. величина смещений невелика. Например, для широты 60° , высоты полета 1000 м и максимального угла крена 30° погрешность вычисления коррекции по сравнению с моделью Земли WGS-84 составит не более 1,5 м.

Далее уточненные координаты передаются в автопилот БВС вместе с меткой времени захвата изображения, где используются в алгоритме расширенного фильтра Калмана для комплексирования навигационных данных.

В целях повышения эффективности вычислений и обеспечения работоспособности алгоритма в реальном времени предлагается использовать скользящее окно поиска соответствий между ключевыми точками. Исходное спутниковое изображение разбивается на неперекрывающиеся квадратные области – тайлы небольшого размера (например, 512x512 пикселей). Нумерация тайлов задаётся по сетке, каждому тайлу приписываются координаты центральной точки (широта, долгота) и индексы сетки (t_x, t_y) . Ключевые признаки SIFT извлекаются для отдельного тайла и сохраняются с привязкой к нему. Для каждого тайла получается набор ключевых точек (координаты и их 128-мерные дескрипторы).

При инициализации задаются начальные координаты БВС (широта, долгота), и тайл, содержащий эти координаты, задается центральным. Навигация реализуется через скользящее окно из тайлов размером 3x3, в центре которого находится текущий тайл. При смещении географических координат за пределы центрального тайла, происходит перестройка тайлов и окно 3x3 скользит вслед за перемещением БВС. Сопоставление ключевых точек с камеры БВС и спутниковой карты осуществляется в пределах скользящего окна, а не по всему загруженному снимку, что на порядок снижает время, затрачиваемое на поиск соответствий, и повышает вычислительную эффективность.

Следует отметить, что вышеприведенный алгоритм выдает оценки координат только в том случае, если на изображении найдено достаточное количество ключевых точек, и пройдена проверка гомографии на корректность. Поэтому частота выдачи географических координат в данном случае варьируется, однако она достаточна для решения задачи комплексирования с навигационными данными от ИНС.

4. Проверка алгоритма на полетных данных

Для тестирования эффективности алгоритма были использованы реальные данные полета, включающие видео с бортовой камеры БВС, GPS координаты, использованные как референсные значения, и данные измерений

углов ориентации, полученные от ИНС. Истинная высота полета составила 900 м. В качестве вычислительной платформы использован микрокомпьютер Orange Pi 5B с 8-ядерным 64-битным процессором Rockchip RK3588S и оперативной памятью 16 ГБ. Камера ELP-USBGS1200P01-L21 с углом обзора 126° оснащена 2,3-мегапиксельным сенсором Aptina AR0234 с глобальным затвором, что минимизирует искажения при быстром движении БВС.

Длительность обработки одного кадра определяется количеством обнаруженных ключевых точек и для используемого вычислительного модуля в среднем составляет 0,3 с. Координаты БВС рассчитываются лишь после выполнения ряда условий: наличие минимально необходимого количества ключевых точек, а также успешное преобразование угловых точек изображения в корректный выпуклый четырехугольник с помощью гомографии.

Графическая визуализация результатов работы алгоритма продемонстрирована на рис. 2. Здесь черный трек соответствует данным, полученным с помощью GPS-приемника БВС, а белый – оценкам координат, выдаваемым алгоритмом.

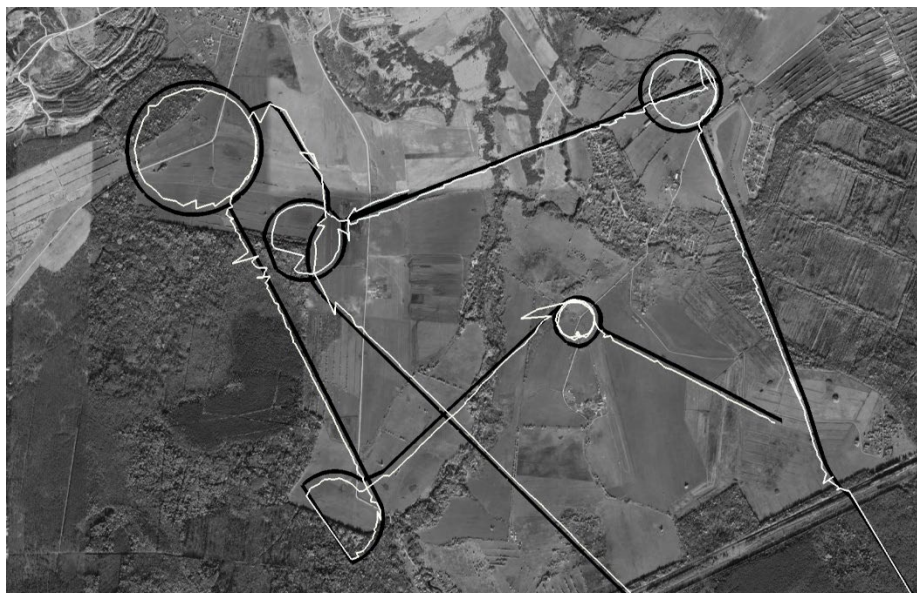


Рис. 2 Сравнение оценок траекторий полета БВС

Черный трек - данные GPS, белый трек – координаты, найденные с помощью предложенного алгоритма

На рис. 3 построен график ошибки оценивания траектории. Отдельные выбросы возникают из-за слабо выраженной текстуры поверхности, а также резких изменений угла крена при выходе на круговую траекторию. Для

уменьшения погрешности и повышения плавности оцененной траектории может применяться дополнительная фильтрация полученных данных.

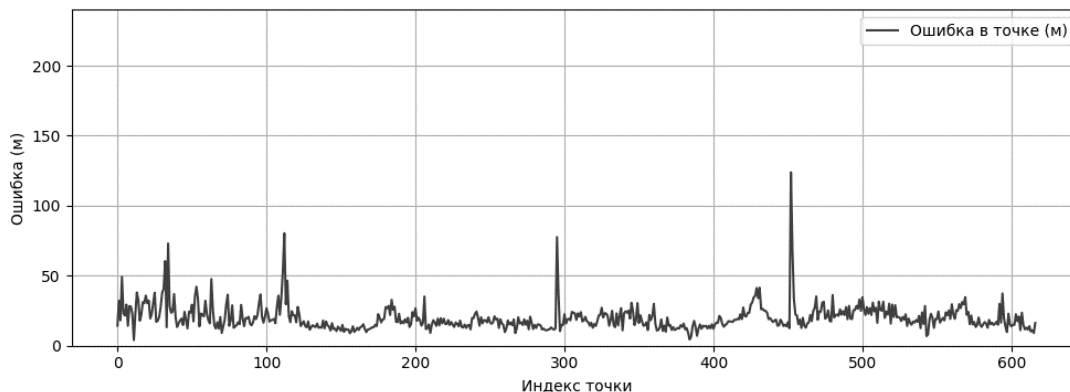


Рис. 3 График ошибки оценивания траектории

При полете на высоте 900 м среднеквадратичная ошибка определения географических координат БВС составила 21,99 м, что удовлетворяет требованиям к данным для комплексирования с ИНС.

5. Анализ результатов и перспективы развития

Учитывая, что координаты вычисляются с частотой обработки кадров, для увеличения скорости обновления навигационной информации и улучшения точности предлагается использовать метод оптического потока для отслеживания ключевых точек между кадрами. Одним из возможных решений является алгоритм Лукаса–Канаде [9], работающий на основе предположений о небольших межкадровых смещениях и постоянстве яркости в локальных областях. Данный метод обеспечивает плавное отслеживание ключевых точек, минимизирует ошибки в определении положения и способствует точному восстановлению траектории движения камеры.

При использовании разреженного подхода, когда анализируются только ключевые точки, а не всё изображение, метод Лукаса–Канаде показывает высокую производительность и может применяться в системах реального времени.

Таким образом, дальнейшая работа над алгоритмом объединит сопоставление изображений с предварительно загруженными спутниковыми картами и отслеживание ключевых точек по оптическому потоку. Фактически, это представляет собой гибридный подход, объединяющий методы

абсолютной визуально-инерциальной навигации и относительной навигации на базе оптического потока. Он позволит достичь высокой точности позиционирования, непрерывности и гладкости получаемых траекторий движения и вычислительной эффективности, что критически важно для реализации абсолютной визуально-инерциальной навигации БВС в реальном времени. Дополнительным преимуществом станет возможность оценки дрейфа ИНС на основе визуальных данных с камеры и динамического отслеживания ключевых точек.

Заключение

В данной работе представлен алгоритм абсолютной визуально-инерциальной навигации БВС, использующий предварительно загруженную спутниковую карту. Описана вычислительная схема алгоритма, приведено обоснование применяемых методик. Проверка алгоритма на реальных данных полёта, включая сравнительный анализ с данными GPS, подтвердила достаточную точность предложенного решения и его готовность к практическому использованию. В заключительной части обозначены перспективные направления для совершенствования алгоритма.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левшонков, Н.В. Обеспечение проведения мониторинга с применением беспилотных авиационных систем / Н.В. Левшонков, И.М. Нафиков, В.И. Митряйкин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2024. – № 4. – С. 150-155.

2. Couturier, A. A review on absolute visual localization for UAV / A. Couturier, M.A. Akhloufi // Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – Vol. 135. – 103666.
3. Han, J. NVINS: Robust Visual Inertial Navigation Fused with NeRF-augmented Camera Pose Regressor and Uncertainty Quantification / J. Han, L.L. Beyer, G.V. Cavaleiro [et al.] // 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2024. – pp. 12601-12608.
4. Weiss, S. Monocular Vision for Long-term Micro Aerial Vehicle State Estimation: A Compendium / S. Weiss, M.W. Achtelik, S. Lynen [et al.] // J. Field Robotics. – 2013. – Vol.30. – pp. 803-831. <https://doi.org/10.1002/rob.21466>
5. Kinnari, J. Season-Invariant GNSS-Denied Visual Localization for UAVs / J. Kinnari, F. Verdoja, V. Kyrki // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – Vol. 7. – No. 4.
6. Tareen, S.K. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK / S.K. Tareen, Z. Saleem // 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Sukkur, Pakistan. – 2018. – pp. 1-10.
7. Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / D.G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 50. – No. 2. – pp. 91-110.
8. Brown, M. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features // M. Brown, D. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2007. – Vol. 74. – No. 1. – pp. 59-73.
9. Lucas, B.D. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision / B.D. Lucas, T. Kanade // Proceedings DARPA Image Understanding Workshop, April 1981, pp. 121-130.

Дата отправки статьи в редакцию: 6.05.2025

Лазарева Полина Александровна, к.ф.-м.н., КНИТУ-КАИ, palazareva@kai.ru

Маликов Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, КНИТУ-КАИ,
a_i_malikov@mail.ru

Дегтярев Геннадий Лукич, д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ,
gldegtyarev@mail.ru

Маннанов Руслан Талгатович, КНИТУ-КАИ, norite.dev@gmail.com