

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632

OPPORTUNISTIC NAVIGATION APPLIED TO INTEGRATION OF ALTERNATIVE POSITIONING AND ELECTRONIC MAPPING BASED ON SPLINE TECHNOLOGY

I. V. Yuyukin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of vulnerability and local incapacity of global satellite navigation systems is formulated. The expediency of alternative positioning methods to create a precedent for high-precision location determination in the satellite-denied environment is revealed. The hypothesis about the impossibility of a separate alternative to meet the requirements of full autonomy of modern navigation when it is necessary to comprehensively solve geolocation scenarios based on the combinatorics of various technologies is put forward. An assumption about the probable advantage of combining data from several information sources to compensate for the disadvantages of each option when predicting an increase in the overall reliability and accuracy of navigation parameters is made. An opportunistic navigation paradigm with the objective function of obtaining location information from mixing additional radio frequency signals with simultaneous visualization of a spline positioning map to determine the location inside a graphic fragment is proposed. The confidence that the approach from the standpoint of spline functions expands the horizon of possibilities of the concept of opportunistic navigation from the purely technical synergetics of the landscape of «signals of opportunity» to the creation of a perspective positioning system using effective electronic mapping is expressed. It is determined that the positioning accuracy of navigation systems is practically necessary to build an optimal trajectory for the safe routing of the vessel. Attention is focused on understanding the optimality of the trajectory as a multi-way planning strategy within the framework of the «receding horizon» paradigm with the obligatory condition that a waypoint with a user-defined probability is achievable by a moving object. It is noted that the modeling of optimal trajectories is implemented by a method similar to the technology of interpolation of navigation contours based on the composition of a B-spline with the provision of an attribute parameter to maintain the same value at each point as a result of the analysis of the spatial anisotropy of the source data. The synthesis of three-dimensional spreading of magnetic map anomalies has been tested to create a mapping standard based on a hybrid approximation algorithm as an implementation of a method for computer rendering a geometric primitive of a function of two variables. The postulate of increasing the potential of high-precision localization of the position of any mobile object in space is interpreted, provided that the ontology of opportunistic navigation is applied in practice as the realization of situational awareness of interdependent technical systems in order to maximize the reliability of observation.

Keywords: satellite-denied environment, opportunistic navigation, technical synergetics, “signals of opportunity”, “receding horizon”, spatial anisotropy, computer rendering, situational awareness.

For citation:

Yuyukin, Igor V. “Opportunistic navigation applied to integration of alternative positioning and electronic mapping based on spline technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.

УДК 656.61.052 656

ОППОРТУНИСТИЧЕСКАЯ НАВИГАЦИЯ В АСПЕКТЕ ИНТЕГРАЦИИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАЙНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

И. В. Ююкин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Сформулирована проблема уязвимости и локальной недееспособности глобальных систем спутниковой навигации. Выявлена целесообразность применения альтернативных способов позиционирования

для создания прецедента высокоточного определения местоположения в среде спутниковой недоступности. Выдвинута гипотеза о невозможности отдельной альтернативы удовлетворить требованиям полной автономии современной навигации при необходимости комплексного решения сценариев геолокации на основе комбинаторики различных технологий. Допущено предположение о преимуществе объединения данных из нескольких источников информации для компенсации недостатков каждого варианта при прогнозировании повышения общей надежности и точности навигационных параметров. Предложена парадигма оппортунистической навигации с целевой функцией получения информации о местоположении из микширования дополнительных радиочастотных сигналов с одновременной визуализацией сплайновой карты позиционирования для определения местонахождения внутри графического фрагмента. Вычислительным экспериментом доказано, что подход с позиций сплайн-функций расширяет горизонт возможностей концепции оппортунистической навигации от сугубо технической синергетики ландшафта «сигналов возможностей» до создания перспективной системы позиционирования при помощи эффективного электронного картографирования. Определено, что точность позиционирования навигационных систем практически необходима для построения оптимальной траектории для безопасной маршрутизации судна. Акцентировано внимание на понимании оптимальности траектории как стратегии многоходового планирования в рамках парадигмы «отступающий горизонт» с обязательным условием достижимости подвижным объектом путевой точки с заданной пользователем вероятностью. Отмечается, что моделирование оптимальных траекторий реализуется методом, аналогичным технологии интерполирования навигационных изолиний на основе композиции В-сплайна с обеспечением сохранения атрибутивным параметром одинакового значения в каждой геометрической точке, как результат анализа пространственной анизотропии исходных данных. Апробировано синтезирование трехмерного спрединга аномалий магнитной карты для создания эталона картографирования на основе гибридного алгоритма аппроксимации как реализация способа компьютерного рендеринга навигационной изоповерхности. Интерпретирован постулат повышения потенциала высокоточной локализации положения любого мобильного объекта в пространстве при условии применения на практике онтологии оппортунистической навигации как реализации ситуационной осведомленности о взаимозависимых технических системах с целью максимального обеспечения надежности обсервации.

Ключевые слова: среда спутниковой недоступности, оппортунистическая навигация, техническая синергетика, сигналы возможностей, отступающий горизонт, пространственная анизотропия, компьютерный рендеринг, ситуационная осведомленность.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Оппортунистическая навигация в аспекте интеграции альтернативного позиционирования и электронного картографирования на основе сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 617–632. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-617-632.

Введение (Introduction)

Несмотря на большие достижения в области глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) присущее им ограничение относительной слабости сигналов космического базирования делает их сравнительно легко блокируемыми. Это создает прецедент недостаточной надежности спутниковой навигации в любое время в любом географическом месте, особенно во внутренних помещениях урбанизированной инфраструктуры, глубоких городских уличных «каньонах» и средах, подверженных вредоносным атакам в виде преднамеренных помех. Городская дорожная среда, включающая высотные здания, может значительно снизить точность и доступность спутниковых сигналов [1].

Проблема локальной недееспособности глобальных систем навигации является особенно актуальной для служб экстренного реагирования, поскольку более 70 % телефонных вызовов исходят из закрытых помещений. Экспериментальное исследование показало, что доступность GPS в комбинации с ГЛОНАСС и Galileo реализуется только для 44 % городской среды Гонконга по главным дорогам каньонного типа, при этом общим требованием является достижение реальной точности определения координат в городских условиях от 1 до 10 м [2]. Условная доступность спутниковых сигналов создает дополнительную проблему для будущих интеллектуальных транспортных систем, требующих надежного, последовательного и защищенного от несанкционированного доступа позиционирования.

Погрешность определения местоположения увеличивается при работе спутникового приемоиндикатора в городских условиях. Проблемное позиционирование в закрытых помещениях в условиях высокой урбанизации фактически является явным «пробелом» в глобальной навигации, с которым GPS в настоящее время не справляется, и использование альтернативных возможностей является одним из потенциальных способов восполнить этот пробел. В настоящее время растет спрос на модификацию приложений спутниковой навигации в городских условиях на основе *метода радиоотпечатков*. Этот инновационный способ непрерывной геолокации основан на измерении уровней сигналов в определенных заранее точках закрытого помещения, которое предварительно производится специалистом в фазе настройки. В фазе навигации выполняется оценка местоположения мобильного подвижного объекта путем сопоставления измерений, проведенных в разных фазах. Перспективный метод позволяет достичь точности локализации порядка 2,5–3 м [3].

В последние два десятилетия предложено несколько технических подходов для устранения ограничения навигации на основе ГНСС. Эти подходы обычно объединяют выходные данные фиксированного числа хорошо смоделированных разнородных датчиков, в частности спутниковых приемоиндикаторов, инерциальных навигационных систем и баз данных цифровых карт, со специализированными алгоритмами обработки сигналов с целью обеспечения надежного позиционирования. Гарантированное фиксирование местоположения всегда ассоциировалось с задачей навигации быстрого и безопасного перемещения судна из одной точки в другую. Навигация не только необходима в современной жизни, степень ее развития оказывает непосредственное влияние на увеличение возможности надежного и точного перемещения в любом месте и в любое время автономных транспортных средств. Около 1 трлн долл. европейской экономики в 2014 г. оказалось в зависимости от точной навигации с помощью GPS [4].

С целью нивелирования проблем ГНСС предлагается новая парадигма для судовождения с целью преодоления ограничений спутниковой навигации. Концепция, получившая название *оппортунистической навигации*, предназначена для извлечения информации о местоположении из микширования всех дополнительно возможных радиочастотных сигналов с параллельной визуализацией высокоточной карты ландшафта многообразия сигналов. Новый подход к преодолению ограничений глобальной навигации заключается в комплексировании приемников ГНСС с широким спектром радиочастотных сигналов в качестве дополнительной навигационной информации. Когнитивная оппортунистическая навигация рассматривает все сигналы как потенциал позиционирования: от обычных сигналов GPS до сигналов связи, традиционно не предназначенных для использования в качестве источников позиционирования, таких как сигналы сотовой связи, точки доступа Wi-Fi и Bluetooth, цифровое или аналоговое телевидение, амплитудно-частотно-модулированное радио-, видеонаблюдение и мультиплексированный радар.

Портативные радиоприемники так называемой оппортунистической навигации непрерывно осуществляют поиск подходящих по характеристикам сигналов, из которых можно извлечь дополнительную прогностическую информацию о местоположении подвижного объекта в режиме реального времени. Ни одна отдельная альтернатива не может удовлетворять современным требованиям полной автономии навигации. Для комплексного решения альтернативных сценариев позиционирования необходима комбинация технологий для полной реализации глобального надежного потенциала определения местоположения [5]. Добавление источников информации в гибридную архитектуру объективно создает прецедент повышения производительности глобальных навигационных систем. Ключевое преимущество объединения данных из нескольких источников заключается в том, что оно может компенсировать недостатки каждого источника, одновременно повышая общую надежность и точность прогнозируемых навигационных параметров [6].

Дополнительную информацию для позиционирования с помощью специфичных пиксельных измерений может раскрыть обычная фотография. Моментальный снимок окружающей местности дает подробную информацию о количестве света, падающего на каждый пиксель оптического датчика на транспортном подвижном объекте. Для того, чтобы определить местоположение пикселя во фрейме изображения, данные, относящиеся к каждому пикселю, практически связаны с его

координатами. Чтобы идентифицировать конкретные пиксели на изображении, соответствующие точкам транскрипции географического ландшафта, необходимо подключить оптический датчик к системе обработки изображений оппортунистической навигации. Положения этих пикселей из фотографии могут содержать геометрическую информацию, полезную для позиционирования. Поэтому видеокамеру также можно использовать в качестве источника дополнительной информации для определения местоположения при условии локального отсутствия спутниковой связи в аспекте реализации концепции оппортунистической навигации. Координаты мобильных объектов определяются путем преобразования координат из кадра видеокамеры в глобальный кадр, учитывая, что положение видеодатчика известно. Концепция видеонаблюдения аналогична визуальной навигации по ориентирам, где пространственная ориентация фиксируется зрительным образом по приметным удаленным объектам. При использовании данного подхода в парадигме оппортунистической навигации имеются большие перспективы в возможности минимизации недостатков классического пеленгования, которое и в современных условиях имеет определенное значение в прибрежном плавании.

Для организации оппортунистической навигации в принципе не требуется построения специальной технической инфраструктуры. Классические сигналы уже сейчас передаются для других полезных целей и поэтому они, по сути, фактически «бесплатны» для пользователя оппортунистической навигации. Достижения в области радиотехники делают оппортунистическую навигацию технически выполнимой в условиях современности. Относительно недавние усовершенствования в области радиотехники установили целесообразность создания радиоприемника, который одновременно принимает и обрабатывает данные множества различных сигналов. Например, уже существуют примеры программно-определяемых когнитивных радиостанций в целях традиционной связи, которые способны во избежание помех по мере необходимости автоматически переключать частоты. Данный тип возможностей, безусловно, является наиболее перспективным для использования в оппортунистической навигации.

В классическом понимании типичную среду оппортунистической навигации необходимо рассматривать как перспективный ландшафт радиочастотных сигналов, внутри которого приемник GPS определяет свое местоположение в пространстве и времени с извлечением дополнительной информации по обратному контуру на основе перемещения информационных выборок с высокой частотой дискретизации от эталона к мобильному приемнику. Вариативная структура оппортунистической навигации с использованием сигналов нескольких спутниковых созвездий на низкой околоземной орбите на основе доплеровских измерений частоты может обеспечить надежные показатели точности определения местоположения. Согласно полученным экспериментальным результатам, позиционирование приемника только с помощью пяти низкоорбитальных спутников реализуется с погрешностью конечного положения, составляющей 22,7 м [7].

Глобальные спутниковые системы приближаются к практическому пределу производительности в классическом контексте. Большой выигрыш возможен за пределами традиционных орбит ГНСС. Спутниковое созвездие с низкой околоземной орбитой в течение длительного времени рассматривалось как перспективная, но дорогостоящая система, требующая больших группировок для быстрых навигационных решений. Появление коммерческих широкополосных сообщений от спутников на низких орбитах побуждает к изучению их двойного назначения: как для связи, так и для вторичной службы позиционирования и синхронизации.

Лаборатория восприятия, разведки и навигации автономных систем в сотрудничестве с военно-воздушными силами США провела масштабную кампанию по анализу сигналов сотовой связи в оппортунистической среде на разных высотах в Южной Калифорнии. Было обнаружено, что сигналы от передатчиков сотовой связи могут надежно приниматься и отслеживаться в навигационных целях приемниками, установленными на высокочастотных самолетах, летающих на высотах до 23000 футов на расстоянии до 100 км. Результаты дополнительного эксперимента оценки потенциала сотового варианта оппортунистической навигации для траектории протяженностью 51 км со стандартным пролетом за 9 мин показали, что трехмерное местоположение высотных воздушных судов оценивается среднеквадратичной погрешностью, равной 10,5 м [8].

Объединение сигналов ГНСС с техническими возможностями сотовой связи 5G гарантирует, что вероятность ошибки определения местоположения ограничивается минимизированием риска целостности стратегии оппортунистической навигации. Эмпирические данные позиционирования наземного транспортного средства, осуществляющего оппортунистическую навигацию с помощью программно-определяемого приемника 5G на траектории протяженностью 1,02 км, пройденной за 100 с, показывают, что среднеквадратичная ошибка определения местоположения составляет 14,9 м [9]. Экспериментальные результаты, демонстрирующие работу беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с использованием комбинированной платформы, гарантируют снижение конечной ошибки локализации с 55 м до 6 м после 30 с преднамеренной имитации недоступности сигналов GPS потребительского класса [10].

Расширенное толкование парадигмы оппортунистической навигации позволяет применить концептуальный потенциал кибернетической безопасности к судовождению как автономному процессу в комбинации с искусственным интеллектом для мотивации создания высокоточного позиционирования в среде отсутствия GPS [11]. Архитектура принятия сопряженных решений искусственного интеллекта в условиях неопределенности может базироваться на основе объединения разнородных данных оппортунистической навигации за счет формирования теоретико-игрового понятия минимизации «цены анархии» при совместном синтезировании ландшафта сигналов от нескольких взаимодополняющих разнородных источников информации [4].

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Анализ уязвимости современных ГНСС как неадекватности из-за подверженности помехам, спуфинг-атакам, глушению спутниковых сигналов.
2. Аналитический обзор проблематики оппортунистической навигации с акцентом на предложение реальной инновационной альтернативы GPS.
3. Рассмотрение вопроса оптимальности траектории на основе алгоритма *B*-сплайнового интерполирования навигационных изолиний как реализация постулата «отступающий горизонт» в парадигме оппортунистической навигации.
4. Исследование феномена наблюдаемости как потенциальной оцениваемости различных состояний среды оппортунистической навигации посредством изучения ландшафтного пространства многообразия «сигналов возможностей».
5. Рассмотрение применимости в судовождении платформы оппортунистической навигации в задаче одновременной локализации и графического отображения движения судна на базе синтеза картографического эталона позиционного географического окружения с определением местонахождения внутри фрагмента карты на основе привязки к измерительному результату.
6. Формирование точки зрения расширения горизонта возможностей концепции оппортунистической навигации для создания надежных элементов перспективной системы позиционирования в судовождении на основе интеграции локализации и эффективного электронного картографирования.
7. Адаптация гибридного алгоритма двумерной аппроксимации под концепцию оппортунистической навигации с целью моделирования спрединга «сигналов возможностей» для обеспечения трехмерного картографирования.
8. Модификация прикладных паскаль-программ применительно к парадигме оппортунистической навигации на основе использования перспективных методов сплайн-функций.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Точность позиционирования навигационных систем практически необходима для геометрического построения оптимальной траектории движения любого подвижного объекта с целью безопасного следования по выбранному маршруту. Эффективная траектория полета надежным способом синтезируется в области динамического поля точности отечественной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС в качестве возможной новой технологии управления воздушным движением в Российской Федерации. Способ геометрического построения оптимальной траектории полета на фоне изменяющегося поля точности позиционирования позволяет обеспечить осведомленность

о ситуации воздушного движения и организовать гибкую маршрутизацию полета в контексте меняющейся воздушной обстановки, а, следовательно, в конечном итоге повысить базовую точность аэронавигационного обеспечения.

В структуре поля точности ГЛОНАСС существуют пространственные и временные вариации. Если на заданной траектории появляется запрещенная зона, то должна быть автоматически выбрана оптимизированная траектория, позволяющая избежать аварийной ситуации и безопасно привести к конечному пункту назначения, которая обеспечивает кратчайший путь. Если применяется критерий выбора оптимальной траектории, то обеспечивается сокращенный путь для дальнемагистральных рейсов. Например, для маршрута полета, который охватывает 5000 км, протяженность трассы сокращается на 60 км, что в условиях высокой интенсивности воздушного движения обеспечит отечественным авиакомпаниям значительный уровень экономии [12]. Аналогичным образом решается задача безопасной маршрутизации морского судна в рамках парадигмы эффективного планирования перехода.

Характеристики точности интегрированного навигационно-временного поля, создаваемого системой ГЛОНАСС, могут быть улучшены при функциональном дополнении стандартного созвездия спутников мобильным псевдоспутником. Методом сравнения результатов натурного эксперимента и математического моделирования выполнена оценка мультисистемного режима с функциональным дополнением в виде псевдоспутника. Особенность исследования состоит в размещении мобильного псевдоспутника на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Для достижения максимальной точности позиционирования предполагалось решение задачи оптимизации траектории полета. В качестве положительного результата эксперимента по применению наукоемкой технологии необходимо отметить, что смещение траектории БПЛА на глиссаде уменьшалось с 80 м до 7 м, а точность интегрированного позиционирования повысилась на 5–7 % по сравнению с традиционным подходом [13].

Реальную оптимальность траектории обеспечивает стратегия многоцелевого планирования движения при условии достижимости подвижным объектом путевой точки с заданной пользователем вероятностью. Прогнозирование пространственной дислокации обеспечивает баланс между навигацией к путевой точке и снижением неопределенности оценки местоположения. Формулирование задачи оппортунистической навигации так называемым «наивным» способом направления мобильного транспортного средства непосредственно к путевой точке на практике в большинстве ситуаций приводит к невозможности финального достижения данной путевой точки из-за плохой оценки точности спутникового позиционирования [14]. Напротив, многоцелевое планирование в вероятностном смысле гарантирует ожидаемое прибытие в контрольную точку маршрута. Многоцелевой подход планирования траектории востребован во многих прикладных приложениях роботизированной навигации, таких как поисково-спасательные операции, исследование агрессивной окружающей среды и адекватное реагирование на стихийные бедствия.

Улучшенная схема сглаживания автоматизированной траектории действительно оптимальным образом реализуется на основе композиции *B*-сплайна, которая дополнительно уточняет траекторию и позволяет плавно управлять автономным роботизированным устройством [15]. Онтология улучшенной модели *B*-сплайна заключается в эффекте генерирования траектории по касательной к первоначальной линии пути с учетом непрерывности по кривизне, так что роботизированное транспортное устройство или БПЛА может своевременно получить плавную команду на рулевое управление для обеспечения следования по оптимально быстрому маршруту. Улучшенная модель гибким образом конфигурирует сглаженную сплайновую траекторию в зависимости от ограничений окружающей среды. Проведенные имитационные исследования подтверждают эффективность и надежность финитного сплайнового алгоритма. Чтобы эффективно сократить путь между путевыми точками маршрута предлагается применять метод *B*-сплайновой аппроксимации, позволяющий организовать последовательность поворотов для уклонения от конфликтных препятствий, что безопасно изменяет траекторию исходного пути, первоначально запланированного на основе интерфейса системы глобальной навигации.

Моделирование оптимальных сплайновых траекторий реализуется методом, аналогичным технологии интерполирования пространственных навигационных изолиний [16]. Под пространственной изолинией понимается условное изображение на плоской или трехмерной карте, представляющее собой линию, в каждой точке которой атрибутивный параметр сохраняет одинаковое значение как результат анализа пространственной анизотропии исходных данных [17]. Фактически набор изолиний в компьютерной визуализации представляет удобный способ рендеринга графического примитива как функции от двух переменных. Суть метода построения изолинии на основе сплайн-интерполяции сводится к расчету сегментных значений патчей координатной сетки на основе математической функции, которая минимизирует кривизну поверхности и определяет аппроксимирующую изоповерхность, проходящую в допустимом приближении от точек измерений. При этом в результате сплайнового приближения к исходной навигационной функции двух переменных каждая полученная пространственная интерполяционная кривая получается математически «гладкой», что подразумевает возможность ее успешной функциональной дифференцируемости в математическом смысле, обеспечивая в практическом приложении наглядную компьютерную визуализацию.

Предлагается синтезирование фрагмента картографирования на основе технологии сплайн-функций для обеспечения дополнительной информации для эталонной привязки как усиление парадигмы оппортунистической навигации [18]. Данный подход автоматически расширяет горизонт возможностей концепции оппортунистической навигации от сугубо технической синергетики ландшафта разнородных радиосигналов до создания надежных элементов перспективной системы определения места судна на основе эффективного электронного картографирования с целью достижения взаимодополняющих преимуществ альтернативного позиционирования.

Фактор наблюдаемости как потенциальной оцениваемости различных состояний среды оппортунистической навигации является важнейшим для прогностического сбора информации в неблагоприятных навигационных условиях при оптимизации траектории в парадигме многоступенчатой концепции «отступающий горизонт» [19]. Наблюдаемость связана с определением возможности последовательной оценки динамического состояния технической системы на основе набора наблюдений, проведенных за определенный период времени. Предполагается, что некий навигационный приемник функционирует в среде, состоящей из некоторого множества передатчиков. Получатель обладает минимальными априорными знаниями о своих собственных состояниях и состояниях среды оппортунистической навигации. Цель приемника состоит в том, чтобы создать карту ландшафта сигнала высокой точности, одновременно локализуясь внутри этой электронной карты в пространстве и времени. Парадигму «отступающий горизонт» можно метафорически представить как феномен «железной карты», причем условное «желе» ландшафтной карты сигналов образно становится тверже по мере того, как стабилизируется работа аппаратуры оппортунистической навигации [19].

Формирование динамического сигнального ландшафта оппортунистической навигации первоначально начинается с неполных знаний о местоположении и географическом окружении и заканчивается точным позиционированием с одновременным построением электронного фрагмента карты окружающей обстановки при гарантированном определении местоположения подвижного объекта внутри этой карты. Предполагается, что носитель бортового приемника способен контролировать свои маневры на базе достижений искусственного интеллекта при соблюдении минимальных условий, в которых окружающая среда является полностью наблюдаемой. Учитывается, что маневры, управляемые приемником, уменьшают минимальную априорную информацию об окружающей среде, необходимую для полной наблюдаемости. Для обеспечения безопасной навигации мобильного объекта ему предписывается эффективная траектория как выбор многошаговой стратегии предсказуемости в рамках реализации концепции «отступающий горизонт» с целью достижения улучшения качества картографирования и точности пространственно-временного позиционирования.

При оптимизации траектории в рамках концепции «отступающий горизонт» на определенном временном шаге вычисляется многоступенчатая перспективная оптимальная последовательность

управления. Однако применяется только первый шаг этой последовательности с опережением, в то время как остальная часть информационного каскада игнорируется. Это мотивировано тем обстоятельством, что на следующем временном шаге становится доступным новое оппортунистическое измерение, которое содержит дополнительную информацию для уточнения оптимальной траектории. Особенностью оппортунистической навигации является зависимость качества оценок не только от пространственной траектории, по которой мобильный объект пересекает окружающую среду, но также и от скорости, с которой он движется по оптимальной траектории. Это позволяет реализовать вопрос оптимизации архитектуры принятия решений посредством предоставления подвижным объектам возможности активно контролировать свои маневры с осознанным упрощением требований априорных знаний об окружающей среде при апостериорном нивелировании задачи полной наблюдаемости.

Основанный на оптимизации алгоритм планирования траектории с «отступающим горизонтом» для динамических систем, работающих в неструктурированных средах, позволяет реализовать стратегическую многоступенчатость в минимальном варианте в два этапа [20]. Предлагаемый подход представляет собой двухшаговую процедуру, которая использует алгоритм планирования движения на первом этапе для эффективного нахождения осуществимого, но, возможно, неоптимального номинального решения задачи планирования траектории, где, в частности, решаются комбинаторные аспекты задачи. Результирующая номинальная траектория затем улучшается на втором этапе планирования в парадигме «отступающего горизонта» на основе оптимизации, которая выполняет локальное уточнение траектории в течение скользящего временного интервала. На втором этапе номинальная траектория использует новый способ для представления конечного многообразия. Это обусловлено тем, что на следующем временном шаге становится доступным новое измерение, содержащее информацию, которая используется для уточнения оптимальной траектории. Двухшаговый подход дает возможность обеспечить теоретические гарантии с точки зрения рекурсивной осуществимости значения целевой функции к сходимости запланированного конечного состояния.

Представляется целесообразным для практического применения аналогичное авионике рассмотрение процесса построения оптимальной траектории движения морского судна в конфликтной среде с сигнальным ландшафтом оппортунистической навигации при использовании методов базисных сплайнов [21]. Цель оптимизации траектории в аспекте автоматизации судовождения состоит в том, чтобы предписать наблюдателю эффективное направление движения, по которому он должен следовать для того, чтобы поддерживать хорошие оценки состояний цели. Оптимизация траектории на основе принципа «отступающего горизонта» стратегически ориентирована на лучший результат по сравнению со случайными траекториями.

Результаты (Results)

Использование магнитного поля Земли в задачах оппортунистической навигации представляется перспективным направлением исследований в качестве инновационной альтернативы для глобальных систем позиционирования. Магнитная навигационная система способна консолидировать данные магнитометра в синергетике с разнообразными другими радиочастотными сигналами для определения текущего местоположения подвижной транспортной единицы в масштабе реального времени в среде недоступности ГНСС. Онтология оппортунистической навигации с использованием аномальных вариаций магнитного поля для постоянной геолокации движущихся объектов за счет применения нового принципа позиционирования посредством суммарного анализа данных, репродуцированных разнородными многочисленными бортовыми датчиками, абсолютно обеспечивает автономное местоопределение.

Базовая идея магнитной навигации заключается в мгновенном фиксировании координат любого подвижного объекта на основе сопоставления измеренных значений бортового магнитометра с компьютерной реализацией, вычисленной с использованием эталонной карты аномалий магнитного поля Земли. Магнитное поле практически используется в качестве геофизической

основы для создания трехмерных эталонов картографирования с возможностью их оптимального применения в целях позиционирования. Навигация по магнитным аномалиям демонстрирует высокоточный потенциал точности там, где GPS локально недоступны или не могут предоставлять информацию с необходимой современности точностью. Поскольку Земля обладает измеримым магнитным полем в любом месте и в любое время, данный факт позволяет считать контуры магнитной интенсивности надежным источником когнитивной навигации в качестве реальной спутниковой альтернативы. Высокая вариативная изменчивость магнитного поля Земли создает потенциальную возможность ориентирования по индивидуальной сигнатуре определенной географической местности. Использование свойств пространственных геофизических полей для автоматической коррекции траектории движения мобильного объекта может быть ориентировано на парадигму оппортунистической навигации.

Исследуемый инновационный метод характеризуется доступностью в любой точке мира в любое время, что дает основания сделать предположение о вероятности преодоления в ближайшем будущем многих существующих технических ограничений с перспективой его автономного использования как полноценной замены ГНСС. Важным аспектом успешной практической реализации магнитной навигации в парадигме оппортунистической навигации является формирование оптимального эталона картографирования как меры информативности, определяющей эффективность использования геофизического поля для точного позиционирования. Информативность магнитного поля практически определяется в виде бортовой электронной карты для географической «привязки». При этом перспективная навигация с коррекцией по специальной электронной карте реализуется в качестве последовательности мгновенных сопоставлений измерений магнитометра с эталоном информативности магнитного поля, хранящимся в памяти бортового компьютера. Новый вариант навигации необходимо понимать как процедуру «привязки» измерений к картографированному эталону на основе поиска глобального экстремума функционала корреляционного сравнения измеренного фрагмента с информативностью карты физических аномалий планетарного магнитного поля.

Представляется целесообразным для решения проблемы картографирования применение методов сплайн-функций. Конкретные результаты сплайнового подхода демонстрируются на основе трансформации экспериментального опыта в рамках проекта аэронавигационного применения аномалий магнитного поля Земли. В качестве показательного примера на рис. 1 представлена синтезированная трехмерная карта аномалий магнитной карты летных испытаний на высоте 300 м над территорией штата Вирджиния, представляющая практическую целесообразность как эталон картографирования на основе апробированного алгоритма двумерной *B*-сплайновой аппроксимации [22].

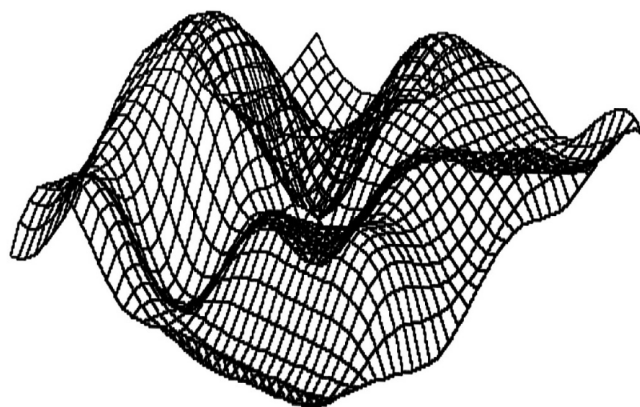


Рис. 1. Фрагмент спрединга сплайн-аппроксимированной карты магнитных аномалий в аспекте парадигмы оппортунистической навигации

Магнитная навигация обеспечивает информационный доступ к решению проблемы альтернативного позиционирования с нивелированием неточностей метода за счет использования

дополнительных радиочастотных измерений разнородной структуры оппортунистической навигации. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 9×9 при общем количестве 81 реперных координатных точек. С целью гладкого приближения перспективы карты магнитных аномалий использовались 36 добавочных точек по каждой координате на фрагментированном аппроксимационном полигоне. Дополнительные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов по *схеме Марсдена*.

Точное позиционирование внутри помещений с использованием магнитного поля в рамках онтологии оппортунистической навигации является современным перспективным методом. Экспериментальные результаты демонстрируют, что инновационная модель магнитного позиционирования, которая может достигать точности 1 м, обладает хорошей надежностью при использовании подхода машинного обучения [23]. Статус задачи альтернативного автономного позиционирования, безусловно, возрастет в эпоху интернета. GPS локализует объекты, существующие снаружи, но не в полной мере подходит для локализации внутри помещений, поскольку распространению радиоволн препятствует инфраструктура.

Решение проблем определения высокоточного местоположения в любой точке земной поверхности средствами магнитной навигации может быть эффективно выполнено на основе физических измерений градиента аномалий магнитных вариаций планетарного поля бортовыми датчиками. Градиентный подход может позволить оптимальным способом смоделировать сложную в математическом отношении пространственную неоднородную структуру планетарного магнитного поля с целью точного позиционирования мобильных объектов на основе учета архитектуры изменчивости спектра ориентированности векторов градиентов. Веер сплайн-градиентов обеспечивает максимальную реалистичность восстановления изогеометрического дизайна местности за счет учета многофакторности вероятных направлений максимальных изменений магнитной аномалии, что реалистично формирует электронную изотропную перспективу геофизического рельефа стохастической природы [24].

Исследуемый инновационный магнитный метод характеризуется доступностью во всем мире в любое время, что дает основание сделать предположение о вероятности преодоления в ближайшем будущем многих существующих технических ограничений за счет использования обширного ландшафта сигналов оппортунистической навигации с перспективой полноценной замены ГНСС. Необходимость поиска дублирующей системы GPS дополнительно мотивирована наличием абсолютного разрешения спуфинговых и джамминговых ситуаций в аспекте реализации кибернетической осведомленности как важной составляющей безопасности морской и авиационной индустрии.

Обсуждение (Discussion)

Платформа оппортунистической навигации аналогична задаче одновременной локализации и визуализации в корреляционно-экстремальных навигационных системах, когда мобильный объект при анализе неполных знаний о своем местоположении и окружении синтезирует картографический эталон своего окружения и его местонахождение определяется внутри фрагмента карты. Непрерывная геолокация осуществляется на основе привязки к измерительному участку, согласно условию совпадения перспективы картографирования с измерительным результатом, при постоянном использовании различных бортовых датчиков по мере перемещения мобильного объекта в евклидовом пространстве. В отличие от картографирования окружающей навигационной среды сигнальный ландшафт классического понимания оппортунистической навигации ориентирован на динамичное применение концепции использования технического изобилия возможностей схем модуляции радиочастотных сигналов в рамках концепции наблюдаемости при иерархической оценке неопределенностей окружающей среды.

В традиционном судовождении электронная карта автоматически загружается на монитор при фиксировании по координатам условного обозначения судна в границах данной карты. Пара-

дигма оппортунистической навигации аналогичным образом распространяет концепцию визуализации динамичного ландшафта радиочастотных сигналов в рамках одновременной интеграции навигации и картографирования. В англоязычной литературе для идентификации данной парадигмы используется аббревиатура SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). В 1986 г. технология семантического позиционирования и картографирования привлекла пристальное внимание многих исследователей, получив быстрое развитие в робототехнике и приложениях виртуальной реальности и областях применения искусственного интеллекта [25]. Алгоритм SLAM при использовании измерений аномальных магнитных вариаций Земли успешно модифицируется в аналогю MagSLAM, действующую в рамках общей концепции оппортунистической навигации с беспрецедентной точностью в 13 м при одновременной оценке корректности пути и самой карты [26].

Представляется перспективной стратегия обработки информации при совместной презентации данных коллаборативной оппортунистической навигации (COpNav) в виде так называемых «сигналов возможностей» в рамках объединенной системы «сотрудничества» GPS, радиосвязи и электронного картографирования. Этимология термина «сигналы возможностей» соотносится с практической реальностью использования для позиционирования сигналов, традиционно предназначенных для целей, отличных от задач навигации. В оппортунистической навигации несколько приемников обмениваются информацией для построения и непрерывного улучшения общего ландшафта сигналов, в пределах которого частоты локализуются в пространстве и времени. Интерпретация понимания системного уровня оппортунистической навигации представлена на рис. 2 в комбинации использования различных вариаций «сигналов возможностей» [27].

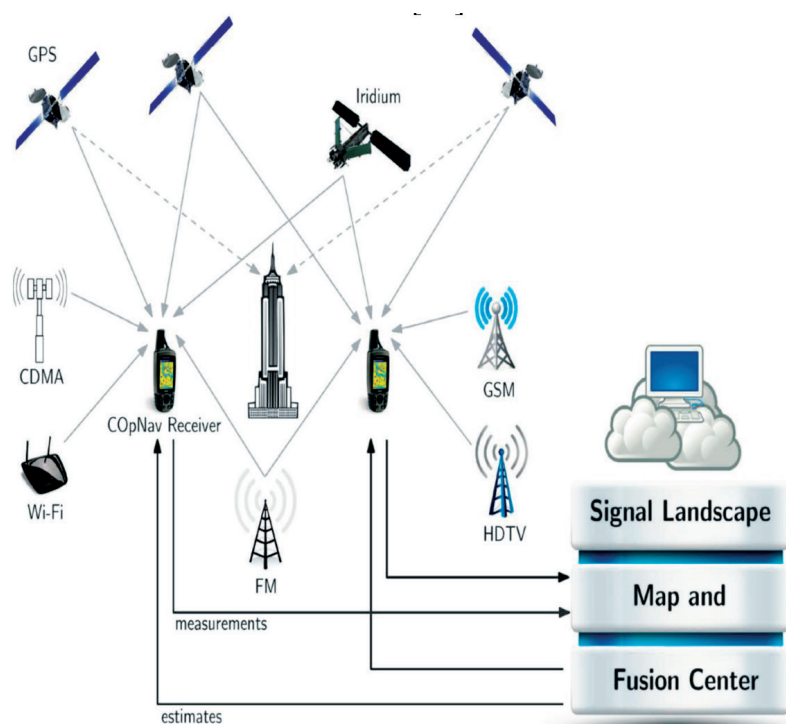


Рис. 2. Интерпретация системного уровня платформы оппортунистической навигации в реализации комбинирования «сигналов возможностей»

Портативные мобильные устройства как приемники оппортунистической навигации в вариативной реализации могут быть установлены на БПЛА или беспилотном наземном транспортном средстве для обеспечения микширования «сигналов возможностей» по традиционным сетям связи. Общие данные обрабатываются в объединенной базе данных (Signal Landscape Map), сформированной на основе виртуальной облачной технологии с целью синтеза сигнальной ландшафтной карты путем коллаборативного сбора информации об уровнях сигналов. Информация по обратному

контуру поступает из информационного центра слияния (Fusion Center) с тем, чтобы упростить отслеживание сигнала на каждом приемнике. По сравнению с парадигмой оппортунистической навигации сегмент управления GPS имеет ограничения, налагаемые точными предварительными оценками местоположения любого подвижного транспортного объекта. Операторы сотовой связи модулируют альтернативные сигналы с помощью множественного доступа с кодовым разделением (CDMA).

Сигналы системы низкоорбитальной спутниковой связи Iridium, наземных станций глобальной системы мобильной связи (GSM) и телевидения высокой четкости (HDTV) модулируются дополнительно с помощью множественного доступа с временным разделением. Точной временной синхронизации способствует наличие высокостабильных атомных часов на спутниках и на каждой наземной станции. В отличие от этого приемник COpNav, входящий в измененный ландшафт сигналов, может иметь меньше предварительной навигационной информации и не может принимать привязки атомарных частот. Пример, приведенный на рис. 2, демонстрирует функциональный характер «технического сотрудничества» оппортунистической навигации и сегмента управления GPS. Карта ландшафта сигнала и центр слияния данных поддерживают последние оценки общего состояния уникальной навигационной системы путем объединения наблюдений, сделанных приемниками оппортунистической навигации. Соответствующие оценки передаются обратно каждому получателю подвижного транспортного объекта.

В системном виде оппортунистическая навигация рассматривает все внешние сигналы как потенциальные «сигналы возможностей» от обычных сигналов ГНСС до сигналов связи, традиционно не предназначенных для использования в качестве источников синхронизации или позиционирования. Относительные временные и частотные смещения каждого сигнала, местоположение передачи и стабильность частоты оцениваются импровизированно по мере необходимости с использованием доступности предварительной информации. На уровне общности задача осведомленности оппортунистической навигации аналогична задаче одновременной локализации и визуального отображения карты позиционирования, представляющей особую популярность в робототехнике.

Ранее точность навигации в 5–10 м казалась оригинальной, в то время как предшествовавшие GPS варианты глобальной навигации обеспечивали точность порядка 1–2 км [28]. В течение двух последних десятилетий наметился ряд тенденций, которые позволили технически улучшить способность ориентироваться в любых условиях и в разных обстоятельствах. Несмотря на то, что GPS оценивается как прогрессивный фактор большинства этих тенденций, существуют ограничения классического спутникового позиционирования, которые со временем становятся все более очевидными по мере все большего ориентирования прогресса на навигацию. Это обуславливает необходимость развития отличных от ГНСС навигационных технологий. Теперь все чаще возникает пользовательское желание использовать ситуационную осведомленность о нескольких взаимозависимых системах с целью максимального обеспечения надежности обсервации.

В средах, где GPS подвергается помехам, атакам с глушением или подменой сигналов, оппортунистическая навигация может служить оптимальным альтернативным средством определения местоположения на основе использования потенциала «сигналов возможностей» [29]. В условиях современности кибернетическая атака на GPS становится абсолютной реальностью. Глобальные спутниковые системы оказываются все более подверженными глушению спутникового сигнала, а большинство приемников GPS уязвимы к подмене навигационных данных. При помощи несанкционированного применения специальных технических средств можно организовать специфичные *спуфинг-атаки*, искусственно вызывающие искажения реальной информации ГНСС. Спуфинг-технология основана на модуляции псевдослучайного кода с переориентированием судового приемоиндикатора от слабого спутникового сигнала на фальсифицированный сильный сигнал от злонамеренного источника [30].

Спутниковый сигнал позиционирования достаточно легко имитировать, поэтому кибернетическая безопасность GPS заслуживает внимания. Запрограммированные отклонения результатов навигационной локализации, вызванные фиктивной подменой, приведут к заранее заданному неправильному местоположению любых мобильных объектов. Абсолютное устранение проблемы возможно только при вариативном использовании такого альтернативного средства позициониро-

вания, как оппортунистическая навигация. Реальным шагом повышения потенциала высокоточной фиксации положения любого мобильного объекта в пространстве может явиться применение на практике парадигмы оппортунистической навигации на основе микширования «сигналов возможностей» с реализацией их расшифровки когнитивным способом.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Факты недееспособности современных ГНСС мотивируют на поиск альтернативных методов позиционирования и рассмотрение возможностей оппортунистической навигации применительно к задачам судовождения.

2. Аналитический обзор проблематики оппортунистической навигации показал применимость перспективной парадигмы позиционирования в судовождении как дополнение структуры GPS традиционными радиосигналами, что не опровергает стратегическую осведомленность глобальной системы спутникового позиционирования, а усиливает инновациями классические возможности глобальной непрерывной геолокации.

3. Исследование феномена альтернативной системы позиционирования необходимо акцентировать на синтез возможностей оппортунистической навигации и одновременного электронного картографирования с приоритетом на моделирование сплайнового эталона информативности по аналогии инновационного обеспечения корреляционно-экстремальной навигации.

4. Сформирована точка зрения об эффективности построения оптимальной траектории на основе возможностей *B*-сплайнов в рамках многоступенчатой концепции «отступающий горизонт» как потенциальная оцениваемость точности позиционирования коллаборативной навигации.

5. Апробирование сплайнового алгоритма под задачу оппортунистической навигации показало положительные результаты по точности и быстродействию расчетов.

6. Модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче трехмерной визуализации картографической составляющей оппортунистической навигации на основе использования гибридного алгоритма двумерной аппроксимации обеспечивает вычислительную устойчивость расчетных процедур.

7. Анализ преимуществ применения технологии когнитивной оппортунистической навигации подтвердил право использования в судовождении потенциала «сигналов возможностей» с целью расширения архитектуры средств искусственного интеллекта для усиления концепции A-Navigation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee H. Urban road safety prediction: A satellite navigation perspective / H. Lee, J. Seo, Z. Z. M. Kassas // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. — Pp. 94–106. DOI: 10.1109/MITS.2022.3181557.
2. Ji S. Potential Benefits of GPS/GLONASS/GALILEO Integration in an Urban Canyon — Hong Kong / S. Ji, W. Chen, X. Ding, Y. Chen, C. Zhao, C. Hu // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 4. — Pp. 681–693. DOI: 10.1017/S0373463310000081.
3. Щекотов М. С. SLAM-метод навигации внутри помещений на основе определения местоположения маяков Bluetooth / М. С. Щекотов // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2021. — № 3. — Pp. 70–81. DOI: 10.14357/20718632210307.
4. Kassas Z. Analysis and synthesis of Collaborative Opportunistic Navigation Systems: Doctoral dissertation / Z. Kassas. — Austin: University of Texas, 2014. — 161 p.
5. Souli N. Online relative positioning of autonomous vehicles using signals of opportunity / N. Souli, P. Kolios, G. El-linas // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. — 2021. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 873–885. DOI: 10.1109/TIV.2021.3124727.
6. Mane S. Aspects on Aircraft Mapping and Navigation System: Theoretical Study / S. Mane // International Journal of Enhanced Research in Educational Development. — 2023. — Vol. 11. — Is. 1. — Pp. 286–290.
7. Orabi M. Opportunistic Navigation with Doppler Measurements from Iridium Next and Orbcomm LEO Satellites / M. Orabi, J. Khalife, Z. M. Kassas // 2021 IEEE Aerospace Conference (AERO). — IEEE, 2021. — Pp. 1–9. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438454.

8. *Kassas Z. Z. M.* Assessment of cellular signals of opportunity for high-altitude aircraft navigation / Z. Z. M. Kassas, J. Khalife, A. Abdallah, C. Lee, J. Jurado, S. Wachtel, J. Duede, Z. Hoeffner, T. Hulsey, R. Quirarte, R. Tay // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2022. — Vol. 37. — Is. 10. — Pp. 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3187142.
9. *Abdallah A. A.* Assessing Real 5G Signals for Opportunistic Navigation / A. A. Abdallah, K. Shamaei, Z. M. Kassas // *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+2020)*. — ION, 2020. — Pp. 2548–2559. DOI: 10.33012/2020.17702.
10. *Morales J. J.* Information Fusion Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM / J. J. Morales, J. J. Khalife, Z. M. Kassas // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2021. — Vol. 23. — Is. 8. — Pp. 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
11. *Ююкин И. В.* Кибернетическая безопасность альтернативной автономной навигации с позиций сплайновой технологии / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
12. *Skrypnik O. N.* Optimization of an aircraft flight trajectory in the GLONASS dynamic accuracy field / O. N. Skrypnik, E. E. Nechaev, N. G. Arefyeva, R. O. Arefyev // *Civil Aviation High Technologies*. — 2019. — Vol. 22. — Is. 5. — Pp. 19–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31.
13. *Скрыпник О. Н.* Оптимизация траектории мобильного псевдоспутника для повышения точности интегрированного навигационно-временного поля ГЛОНАСС / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев // *Современные наукоемкие технологии*. — 2020. — № 2. — С. 51–58. DOI: 10.17513/snt.37914.
14. *Yang Y.* UAV Waypoint Opportunistic Navigation in GNSS-Denied Environments / Y. Yang, J. Khalife, J. J. Morales, Z. M. Kassas // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2022. — Vol. 58. — Is. 1. — Pp. 663–678. DOI: 10.1109/TAES.2021.3103140.
15. *Sellers T.* A node selection algorithm to graph-based multi-waypoint optimization navigation and mapping / T. Sellers, T. Lei, C. Luo, G. Eu Jan, J. Ma // *Intelligence & Robotics*. — 2022. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 333–354. DOI: 10.20517/ir.2022.21.
16. *Ююкин И. В.* Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
17. *Воробьев А. В.* Подход к обнаружению и устранению артефактов пространственных изолиний в приложениях Веб-ГИС / А. В. Воробьев, Г. Р. Воробьева // *Компьютерная оптика*. — 2023. — Т. 47. — № 1. — С. 126–136.
18. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
19. *Kassas Z. M.* Receding horizon trajectory optimization in opportunistic navigation environments / Z. M. Kassas, T. E. Humphreys // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2015. — Vol. 51. — Is. 2. — Pp. 866–877. DOI: 10.1109/TAES.2014.140022.
20. *Bergman K.* An Optimization-Based Receding Horizon Trajectory Planning Algorithm / K. Bergman, O. Ljungqvist, T. Glad, D. Axehill // *IFAC-PapersOnLine*. — 2020. — Vol. 53. — Is. 2. — Pp. 15550–15557. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2399.
21. *Ююкин И. В.* Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
22. *Ююкин И. В.* Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
23. *Sun M.* Indoor Geomagnetic Positioning Using the Enhanced Genetic Algorithm Based Extreme Learning Machine / M. Sun, Y. Wang, S. Xu, H. Yang, K. Zhang // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2021. — Vol. 70. — Pp. 1–11. DOI: 10.1109/TIM.2021.3072699.
24. *Yuyukin I. V.* Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional / I. V. Yuyukin // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2032. — № 1. — Pp. 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.

25. Chen W. An Overview on Visual SLAM: From Tradition to Semantic / W. Chen, G. Shang, A. Ji, C. Zhou, X. Wang, C. Xu, Z. Li, K. Hu // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Is. 13. — Pp. 3010. DOI: 10.3390/rs14133010.
26. Lee T. N. MagSLAM: Aerial simultaneous localization and mapping using Earth's magnetic anomaly field / T. N. Lee, A. J. Canciani // *Navigation*. — 2020. — Vol. 67. — Is. 1. — Pp. 95–107. DOI: 10.1002/navi.352.
27. Kassas Z. M. Collaborative opportunistic navigation / Z. M. Kassas // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2013. — Vol. 28. — Is. 6. — Pp. 38–41. DOI: 10.1109/MAES.2013.6533743.
28. Raquet J. Non-GNSS radio frequency navigation / J. Raquet, R. K. Martin // 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. — IEEE, 2008. — Pp. 5308–5311. DOI: 10.1109/ICASSP.2008.4518858.
29. Kassas Z. M. I am not afraid of the GPS jammer: resilient navigation via signals of opportunity in GPS-denied environments / Z. M. Kassas, J. Khalife, A. A. Abdallah, C. Lee // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. — 2022. — Vol. 37. — Is. 7. — Pp. 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3154110.
30. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Logan в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

REFERENCES

1. Lee, Halim, Jiwon Seo, and Zaher Zak M. Kassas. "Urban road safety prediction: A satellite navigation perspective." *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 14.6 (2022): 94–106. DOI: 10.1109/MITS.2022. 3181557.
2. Ji, Shengyue, Wu Chen, Xiaoli Ding, Yongqi Chen, Chunmei Zhao, and Congwei Hu. "Potential Benefits of GPS/GLONASS/GALILEO Integration in an Urban Canyon — Hong Kong." *The Journal of Navigation* 63.4 (2010): 681–693. DOI: 10.1017/S0373463310000081.
3. Shchekotov, M.S. "SLAM method of indoor navigation based on Bluetooth beacon localization." *Journal of Information Technologies and Computing Systems* 3 (2021): 70–81. DOI: 10.14357/20718632210307.
4. Kassas, Zaher. Analysis and synthesis of Collaborative Opportunistic Navigation Systems. Dr. Diss. Austin: University of Texas, 2014.
5. Souli, Nicolas, Panayiotis Kolios, and Georgios Ellinas. "Online relative positioning of autonomous vehicles using signals of opportunity." *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 7.4 (2022): 873–885. DOI: 10.1109/TIV.2021.3124727.
6. Mane, Shreya. "Aspects on Aircraft Mapping and Navigation System: Theoretical Study." *International Journal of Enhanced Research in Educational Development* 11.1 (2023): 286–290.
7. Orabi, Mohamad, Joe Khalife, and Zaher M. Kassas. "Opportunistic navigation with Doppler measurements from Iridium Next and Orbcomm LEO satellites." *2021 IEEE Aerospace Conference (AERO)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/AERO50100.2021.9438454.
8. Kassas, Zaher Zak M., Joe Khalife, Ali Abdallah, Chiawei Lee, Juan Jurado, Steven Wachtel, Jacob Duede, Zachary Hoeffner, Thomas Hulsey, Rachel Quirarte, and RunXuan Tay. "Assessment of cellular signals of opportunity for high-altitude aircraft navigation." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 37.10 (2022): 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3187142.
9. Abdallah, Ali A., Kimia Shamaei, and Zaher M. Kassas. "Assessing Real 5G Signals for Opportunistic Navigation." *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2020)*. ION, 2020. DOI: 10.33012/2020.17702.
10. Morales, Joshua J., Joe J. Khalife, and Zaher M. Kassas. "Information Fusion Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.8 (2021): 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
11. Yuyukin, Igor V. "Cybernetic security of alternative offline navigation from the standpoint of spline technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 346–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-346-364.
12. Skrypnik, Oleg N., Evgeniy E. Nechaev, Natalya G. Arefyeva, and Roman O. Arefyev. "Optimization of an aircraft flight trajectory in the GLONASS dynamic accuracy field." *Civil Aviation High Technologies* 22.5 (2019): 19–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-19-31.
13. Skrypnik, O. N., and R. O. Arefev. "Optimization of a mobile pseudolite track for increasing accuracy of the GLONASS integrated navigation-and-time field." *Modern High Technologies* 2 (2020): 51–58. DOI: 10.17513/snt.37914.
14. Yang, Yanhao, Joe Khalife, Joshua J. Morales, and Zaher M. Kassas. "UAV Waypoint Opportunistic Navigation in GNSS-Denied Environments." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 58.1 (2022): 663–678. DOI: 10.1109/TAES.2021.3103140.

15. Sellers, Timothy, Tingjun Lei, Chaomin Luo, Gene Eu Jan, and Junfeng Ma. "A node selection algorithm to graph-based multi-waypoint optimization navigation and mapping." *Intelligence & Robotics* 2.4 (2022): 333–354. DOI: 10.20517/ir.2022.21.
16. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
17. Vorobev, Andrei Vladimirovich, and Gulnara Ravilevna Vorobeva. "An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in Web GIS applications." *Computer Optics* 47.1 (2023): 126–136.
18. Yuyukin, Igor V. "Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
19. Kassas, Zaher M., and Todd E. Humphreys. "Receding horizon trajectory optimization in opportunistic navigation environments." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 51.2 (2015): 866–877. DOI: 10.1109/TAES.2014.140022.
20. Bergman, Kristoffer, Oskar Ljungqvist, Torkel Glad, and Daniel Axehill. "An Optimization-Based Receding Horizon Trajectory Planning Algorithm." *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 15550–15557. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2399.
21. Yuyukin, Igor V. "Optimal spline trajectory of the ship informative route in the map-aided navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
22. Yuyukin, Igor V. "Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
23. Sun, Meng, Yunjia Wang, Shenglei Xu, Hongchao Yang, and Kewei Zhang. "Indoor Geomagnetic Positioning Using the Enhanced Genetic Algorithm Based Extreme Learning Machine." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021). DOI: 10.1109/TIM.2021.3072699.
24. Yuyukin, I. V. "Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2032. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.
25. Chen, Weifeng, Guangtao Shang, Aihong Ji, Chengjun Zhou, Xiyang Wang, Chonghui Xu, Zhenxiong Li, and Kai Hu. "An Overview on Visual SLAM: From Tradition to Semantic." *Remote Sensing* 14.13 (2022): 3010. DOI: 10.3390/rs14133010.
26. Lee, Taylor N., and Aaron J. Canciani. "MagSLAM: Aerial simultaneous localization and mapping using Earth's magnetic anomaly field." *Navigation* 67.1 (2020): 95–107. DOI: 10.1002/navi.352.
27. Kassas, Zaher M. "Collaborative opportunistic navigation." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 28.6 (2013): 38–41. DOI: 10.1109/MAES.2013.6533743.
28. Raquet, John, and Richard K. Martin. "Non-GNSS radio frequency navigation." *2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. IEEE, 2008. DOI: 10.1109/ICASSP.2008.4518858.
29. Kassas, Zaher M., Joe Khalife, Ali A. Abdallah, and Chiawei Lee. "I am not afraid of the GPS jammer: resilient navigation via signals of opportunity in GPS-denied environments." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 37.7 (2022): 4–19. DOI: 10.1109/MAES.2022.3154110.
30. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: uukiniv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2023 г.
Received: April 28, 2023.