

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014

THE PROBLEM OF IMPLEMENTING THE CONCEPT OF MAXIMUM INTEGRATION OF HETEROGENEOUS DATA IN PRACTICAL NAVIGATION

I. V. Yuyukin

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

The topic of the work is the research of the problem of the practical realization of opportunistic navigation, which actually consists in the fact that the “signals of opportunity” are not optimized for global navigation according to their original purpose. A hypothesis about the possibility of strategic application of the navigation concept based on the principles of data integration with the objective existence of tactically surmountable difficulties is put forward. In the conditions of vulnerability of the global satellite system, an approach to use an additional source of combined signals in order to continuously ensure accurate geolocation of water transport vehicles is proposed. The comparative assessment confirms the comparability of the positioning error of alternative navigation with the data of classical satellite observations of mobile objects. An assumption about the effectiveness of spline modeling of the cartographic standard of informativeness for the practical organization of the basic principle of opportunistic positioning by analogy with the paradigm of correlation-extreme navigation is made. A computer visualization of a fixed fragment of the ocean gravitational field based on spline approximation is performed in order to optimize the problem of simultaneous localization and three-dimensional representation of the ship movement in a graphical environment unaffiliated with foreign software. A hybrid algorithm for mathematical synthesis of the navigational isosurface has been tested as a harmonized support for the navigation staff to implement the “terrain-referenced procedure” in the landscape coordinate space. The variants of the “ambiguity resolution” problem implementation in the issue of maximum integration of heterogeneous navigation data are considered. The probability of practical use of the opportunistic navigation postulates in marine applications, taking into account the “navigation gap” factor for leveling local satellite incapacity with a real possibility of countering malicious interception of ship control, is estimated. The expediency of using the factor of observational reckoning of the vessel path as an additional condition for navigation safety in the aspect of packet processing of the “signals of opportunity” slot is substantiated.

Keywords: opportunistic navigation, “signals of opportunity”, geolocation, “terrain-referenced procedure”, “ambiguity resolution”, “navigation gap”, observational reckoning.

For citation:

Yuyukin, Igor V. “The problem of implementing the concept of maximum integration of heterogeneous data in practical navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.

УДК 656.61.052

ПРОБЛЕМА РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ МАКСИМАЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ В ПРАКТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

И. В. Ююкин

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

Темой работы является исследование проблемы практической реализации оппортунистической навигации, которая фактически заключается в том, что «сигналы возможностей» по оригинальному предназначению не оптимизированы для глобальной навигации. Выдвинута гипотеза о возможности стратегического применения концепции навигации, основанной на принципах максимального интегрирования данных при объемном существовании тактически преодолимых сложностей. В условиях уязвимости глобальной спутниковой системы предложен подход использования дополнительного источника комбинированных сигналов с целью непрерывного обеспечения точной геолокации средств водного транспорта. В сравнительной оценке подтверждена сопоставимость погрешности позиционирования альтернативной навигации с данными клас-

сических спутниковых наблюдений мобильных объектов. Сделано предположение об эффективности сплайнового моделирования картографического эталона информативности для практической организации базового принципа оппортунистического позиционирования по аналогии с парадигмой корреляционно-экстремальной навигации. Выполнена компьютерная визуализация фиксированного фрагмента гравитационного поля океана на основе сплайн-аппроксимации с целью оптимизации задачи одновременной локализации и трехмерного отображения движения судна в неаффилированной с зарубежным программным обеспечением графической среде. Гибридный алгоритм математического синтеза навигационной изоповерхности апробирован в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу для реализации «процедуры привязки к местности» в ландшафтном пространстве координат. Рассмотрены варианты реализации проблемы «разрешения неоднозначности» в процессе решения вопроса максимального интегрирования разнородных навигационных данных. Выполнена оценка вероятности практического использования постулатов оппортунистической навигации в морских приложениях с учетом фактора «навигационного пробела» для нивелирования локальной спутниковой недееспособности при реальной возможности противодействия злоумышленному перехвату контроля управления судном. Обоснована целесообразность применения фактора наблюдательного счисления пути судна как дополнительного условия безопасности судовождения в аспекте пакетной обработки слота «сигналов возможностей».

Ключевые слова: оппортунистическая навигация, «сигналы возможностей», геолокация, «процедура привязки к местности», «разрешение неоднозначности», «навигационный пробел», наблюдательное счисление.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.

Введение (Introduction)

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) способствуют масштабной инновации в судовождении благодаря уникальному сочетанию дециметровой точности определения координат, глобальной доступности информации в любой точке на земной поверхности в любое время и при любых метеоусловиях [1]. Однако использование GPS в современных условиях не гарантирует постоянного выполнения для морских потребителей требования непрерывного получения координатно-временной информации без искажений. Переориентирование в условиях недоступности или недостоверности спутниковых систем на альтернативный помехоустойчивый вариант геолокации возможно при использовании автономных средств водного транспорта.

С целью нивелирования проблем ГНСС предлагается новый подход к позиционированию для преодоления ограничений спутниковой навигации. Представляется возможным использовать в судовождении потенциал авиационной концепции оппортунистической навигации для непрерывного местоопределения на основе микширования всех возможных радиочастотных сигналов с параллельной визуализацией высокоточной карты картографического ландшафта. Новая парадигма преодоления уязвимостей глобальной навигации заключается в максимальном комплексировании различных приемников с широким спектром радиочастотных сигналов в качестве дополнительной навигационной информации.

В условиях современности автономные транспортные средства ориентированы на постоянный поток сигналов и информации из внешних источников для локализации, планирования маршрута и ситуационной осведомленности о рисках, связанных с аномалиями позиционирования [2]. Стандартный подход включает использование информации о местоположении, навигации и времени, получаемой от GPS. Современные автономные транспортные средства уязвимы перед потерей или ослаблением каналов связи. Существует глобальная тенденция для увеличения радиочастотных помех как случайных, так и преднамеренных. Глушение и подмена гражданских спутниковых сигналов превратились из гипотетической угрозы в экспериментально подтвержденную проблему транспортной безопасности. В неблагоприятный момент, когда ГНСС становятся недоступными, подвижные объекты для успешного продолжения навигации могут использовать максимальную интеграцию мультисенсорных систем в рамках совместной радиосвязи с одновременным картографированием навигационной изоповерхности [3].

Современному судовождению необходима альтернативная надежная и безотказная система позиционирования, работающая повсеместно и в любое время с точностью, соответствующей назначению высокой миссии непрерывной всепогодной навигации. С первых попыток применения на практике онтологии оппортунистической навигации в 2010 г. при смоделированном эксперименте в австралийском центре робототехники Сиднейского университета максимальная погрешность определения местоположения первоначально составила 22 м [4]. Конфигурация оппортунистической навигации в данном испытании содержала информацию из числа 4–7 доступных «сигналов возможностей». Дальнейшее улучшение геометрии траекторий сигналов позволило увеличить точность позиционирования до 9 м, что является стимулирующим показателем необходимости разработки перспективных математических способов обработки навигационной информации в аспекте практического применения оппортунистической навигации на водном транспорте. Согласно результатам многовариантных экспериментов 2023 г. при финансовой поддержке Министерства транспорта США по оценке точности оппортунистической навигации погрешность геолокации мобильного средства составляет во всех случаях менее 10 м с наилучшим возможным показателем в 4,4 м [5]. Для морских приложений использование «сигналов возможностей» обеспечивает точность местопредопределения не хуже 6 м согласно данным экспериментов двухгодичной давности [6]. Максимальное интегрирование сигналов улучшает точность навигации как процесса с обеспечением потенциальной точности в 10 м, аналогичной точности GPS по открытому коду для гражданских потребителей без использования дифференциального режима [7], [8].

По мере совершенствования автономных технологий стабильная и точная навигационная система становится обязательным условием безопасной и эффективной эксплуатации водного транспорта. В ходе практической реализации в морском приложении концепции максимального интегрирования разнородных навигационных данных сформулированы следующие задачи:

1. Оценка точности классического позиционирования GPS в сравнении с вариативными погрешностями геолокации оппортунистической навигации.
2. Анализ локальной недееспособности современных спутниковых систем с позиций постулата «навигационного пробела».
3. Уточнение фактора целостности как критерия оценки надежности и измерения уровня доверия к навигационной информации в системе мониторинга на основе технического оппортунизма для обеспечения точности позиционирования в режиме реального времени.
4. Синтезирование картографического эталона информативности фрагмента гравитационного поля океана в практическом приложении для реализации задачи одновременной локализации и графического отображения движения судна в трехмерном пространстве координат.
5. Модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче компьютерной анимации картографической составляющей оппортунистической навигации на основе использования методов сплайн-функций.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Использование пакетной радиосвязи является наиболее перспективной альтернативой GPS. Для реализации оппортунистической навигации коммуникационные портативные устройства, дополненные адаптированными датчиками для совместной геолокации, передают друг другу данные о наблюдениях в окружающей среде для увеличения объема сетевой информации с целью построения и постоянного уточнения глобальной ландшафтной карты позиционирования [9]. Обмен данными датчиков на единой интегрированной платформе помимо устранения недостатков ГНСС может обеспечить дальнейшее повышение производительности позиционирования.

Поле сигнальных данных предлагается размещать в виртуальном облаке, так что всякий раз, когда спутниковые данные становятся локально недоступными или ненадежными, мгновенное переориентирование на «сигналы возможностей» обеспечивает непрерывную точную навигацию с помощью синтезированного компьютерного картирования. Предлагается принципиально новая коммуникационная стратегия в судовождении для обмена комбинированной информацией,

согласно которой вместо передачи с фиксированной скоростью данные передаются только тогда, когда ошибка определения местоположения судна превышает заданный пользователем при существующих обстоятельствах плавания предельный порог допустимой погрешности с прогнозируемой вероятностью. В ходе эксперимента, демонстрирующего компромисс между производительностью локализации и концентрацией данных позиционирования, было выявлено, что применение инновационной системы связи позволило сократить совокупный объем транслируемой информации на 86,6 % по сравнению с традиционной схемой с фиксированной скоростью передачи информации [10]. Итоговая ошибка локализации после 30 с отсутствия GPS была уменьшена по сравнению с использованием только инерциальных систем с 55 м до 6 м при использовании оппортунистического варианта [11].

Оптимальным образом процесс интегрирования реализуется на базе нескольких приемников со случайной конфигурацией. Каждому приемнику можно приписать некоторые априорные знания о собственных состояниях из наблюдаемых данных. Датчики получают результаты наблюдения от каждого источника информации, объединенного с помощью центра слияния для оценивания текущего состояния всех источников информации. Практически выгодно уменьшить неопределенность полученных оценок состояния, однако во многих классических сценариях приемникам алгоритмически запрещено менять позиции, занимая более благоприятные местоположения для достижения наилучшего снижения неопределенности. Вместо этого, возможно, более эффективным решением могло быть задействование дополнительных источников сигналов.

Для повышения отказоустойчивого положения системы контроля оппортунистической навигации необходимо улучшить возможности обнаружения неисправностей. За счет интенсивности технической интеграции «сигналов возможностей» границы уровня системной защиты можно сделать меньшими, чем предлагаемые в настоящее время. Согласно представленным результатам моделирования было выявлено, что активация оппортунистической навигации сокращает разрывы между вертикальными и горизонтальными границами уровня кибернетической защиты более чем на 55 % и 70 %, соответственно, по сравнению с технологией использования спутниковых измерений [12]. Сокращение обеспечивает более высокую доступность системы мониторинга целостности контроля, позволяя навигационной системе соответствовать более строгим стандартам безопасности. По мере того как эти транспортные средства приближаются к полной автономии, точность и целостность их навигационной системы становятся все более ориентированными на использование «сигналов возможностей». В то время как понятие точности говорит само за себя, понятие целостности менее очевидно несмотря на то, что оно имеет первостепенное значение для оппортунистического применения на водном транспорте с точки зрения надежного обеспечения безопасности. При уточнении термина «целостность» его можно рассматривать как критерий для оценки надежности и измерения уровня доверия к информации, получаемой навигационной системой.

Навигационная система с высокой степенью целостности должна быть способна обнаруживать и отклонять ошибочные измерения, обеспечивая достоверность показателей работы системы в любое время. В определенной мере мониторинг целостности может быть обеспечен только с помощью ГНСС. Однако тип информации о целостности бесполезен для спутниковых приложений реального времени, поскольку коррекция выявленных аномалий GPS требует точного хронометража, чтобы идентифицировать сбой спутниковой службы и передать информацию для обеспечения синхронизации. Таким образом, альтернативные системы мониторинга на основе технического оппортунизма позволяют не только повысить надежность позиционирования как такового, но и обеспечить точность определения местоположения в режиме реального времени. Представляется целесообразным активно использовать фактор целостности в судовождении при разработке инновационных систем альтернативной навигации. К сожалению, сигналы спутниковой навигации гарантированно доступны не во всех средах. Чтобы решить эту проблему, исследуется возможность использования последовательностей графических изображений для навигации. Представляется логичным допущением применимость оппортунистического подхода

в вопросе определения места судна с позиций электронного картографирования в качестве перспективы использования в автономном судовождении.

Все методы интегрированной навигации требуют проведения трех основных операций: поиска местоположений на картографированном изображении, подходящего для отслеживания, сопоставления этих местоположений с ранее синтезированным изображением и прогностического вычисления результирующего движения мобильного объекта, позиционирование которого подлежит постоянному фиксации [13], [14]. Метод сопоставления измерений с картографированным эталоном информативности корреляционно-экстремальной навигационной системы, по сути, является реализацией прямой географической «привязки» с использованием информации о местоположении и ориентации судна для геокодирования каждого пикселя или характерной точки, зафиксированной видеокамерой как варианта интегрированной обработки информации. Корреляционно-экстремальная навигационная система высокой помехозащищенности в оппортунистическом варианте, в которой используется взаимозависимость параметров геофизических полей Земли с географическими координатами судна, является реалистичной альтернативой GPS [15]. В процессе автономного судовождения измеряемые параметры планетарного геофизического поля постоянно сравниваются с априорным синтезированным эталоном методом совмещения изображений по критерию взаимной корреляции [16]. В связи с этим маршрутизация движения судна по профилю навигационной изоповерхности объединяет задачи математического восстановления карты геофизического поля и ориентирования по конкретным изолиниям, вдоль которых реализация характеристической изоповерхности сохраняет постоянные параметрические значения.

Совместное решение задач программируемого плавания с непрерывным оцениванием состояния совпадения виртуальной модельной карты геофизического поля с лучшей точностью, чем счисление пути судна, позволяет постоянно уточнять местоположение морского подвижного объекта с помощью специальной бортовой навигационной системы в качестве практической реализации обсервационного счисления в ситуации неточного совпадения профилей измеряемой навигационной изоповерхности с синтезированным эталоном картографирования. Под фактической обсервацией в нетрадиционном варианте понимается строгое совпадение смоделированного картографического фрагмента из оперативной памяти бортового компьютера с измеряемой рельефной перспективой.

В случае графических расхождений предлагается применение обсервационного счисления как метода определения координат судна, основанного на комплексном использовании информации, поступающих от автономных технических средств судовождения и данных, получаемых в результате непрерывного измерения навигационных параметров. В случае применения аналитического счисления, из-за графического несовпадения принципа позиционирования пакетной навигации, кратковременно прекращается выполнение задачи «привязки» к рельефному контуру местности и реализуется в полном объеме обсервационное счисление. Как следствие совместной обработки счисляемых и обсервованных координат производится непрерывное уточнение позиционирования с точностью каждого последующего местоположения выше точности предыдущего за счет пассивного накопления навигационной информации. Поскольку измерения навигационных параметров выполняются автоматически частотным образом, линия пути в данном случае практически является геометрическим набором дискретных обсерваций. Традиционный метод письменного счисления, заключающийся в прогнозируемом вычислении координат судна по фактическим данным о направлении и скорости движения приобретает особую актуальность в аспекте практического применения парадигмы оппортунистической навигации в судовождении. Фактически предлагаемая реализация концепции обсервационного счисления представляет учет априорной информации о траекторной геометрии движения морского подвижного объекта при коррекции показателей навигационной системы по данным о конкретном геофизическом поле.

Точность определения местоположения пикселей, или характерных точек видеоизображения, при картографированной «привязки» в финальном варианте зависит от точности позиционирования мобильного объекта. Существует множество решений, использующих изображения с бортовой видео-

камеры для сопоставления объектов с эталонным изображением с целью вычисления глобального местоположения [17]. Для сходимости этих методов необходима относительно точная предварительная оценка местоположения. Любая спутниковая система обеспечивает долговременную высокую точность определения абсолютного положения и скорости потребителей, но при определенных обстоятельствах наблюдаются локальные аномалии в ее работе. При этом *инерциальная навигация* функционирует в любых средах, но точность позиционирования со временем ухудшается. Интегрированная система может использовать преимущества для уточненного определения траектории по местоположению, скорости и ориентации в евклидовом пространстве. Во время любого сбоя в работе ГНСС точность навигационного решения зависит исключительно от качества инерциальных датчиков. За последнее десятилетие поддержка местоопределения визуализированными изображениями является актуальной перспективой в мультисенсорной интегрированной навигации. Видеокамеры по своей сути обладают высокой пропускной способностью и, следовательно, имеют высокий потенциал для получения очень точного углового разрешения, а также они легкодоступны и просты в использовании для интерфейсной конфигурации.

Высокоточная инерциальная навигационная система с поддержкой изображений может быть предложена в качестве дополнительной альтернативы ГНСС в ситуации недоступности спутниковых навигационных систем. Оппортунистическая интеграция, основанная на оптических методах, гарантирует надежность навигационной системы, даже если на изображениях наблюдается всего несколько характерных точек. Это может быть точечный объект, связанный с углом зрения, или изолиния информативного участка на электрооптическом изображении для поддержки функционирования оппортунистической системы. Глобальный анализ наблюдаемости технической интеграции информационных данных гарантирует, что инновационная навигационная система является дееспособной при любых условиях. Экспериментальное моделирование показало, что интегрированные решения с высокой точностью определения местоположения на уровне сантиметра и ориентации на уровне половины градуса могут быть достигнуты для гравитационно-инерциальной системы [18].

ГНСС не может устойчиво работать в урбанизированных условиях, где спутниковые сигналы могут быть заблокированы, или в помещениях, где сигналы могут быть недоступны. Навигация с использованием изображений для непрерывной геолокации может представлять реальную альтернативу спутниковой технологии позиционирования. Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что измеряемые параметры геометрических изображений постоянно сравниваются с предварительно созданным характеристическим эталоном по аналогии с корреляционно-экстремальной навигацией [19]. С позиций данного подхода маршрутизация движения судна объединяет задачи математического восстановления карты навигационных изображений и ориентирования аналогично изолинейному плаванию по постоянным параметрическим значениям. Задача программируемой маршрутизации судна предполагает постоянное уточнение местоположения морского подвижного объекта с помощью специальной бортовой аппаратуры при дискретном измерении параметров графических изображений и их точном сопоставлении с навигационными данными.

Такие датчики изображения как, например, видеокамеры, которые не подвержены блокировке спутникового сигнала, как правило, имеют низкую стоимость и обеспечивают эффективные измерения в виде характерных точек в любых условиях. Измерения изображения, полученные с помощью видеокамеры, позволяют откалибровать и ограничить изменяющиеся во времени инерционные погрешности. Расстояние от камеры до объекта как фактор восприятия глубины изображения представляет собой ключевой аспект перспективной навигации. Оснащение одной видеокамеры небольшим подвесным лазерным датчиком дальности позволяет транспортному объекту устойчиво ориентироваться в пространстве без использования GPS. Оптические датчики, по сути, обладают высокой пропускной способностью, что позволяет получить очень точное измерительное разрешение. Цифровые изображения легкодоступны и просты, что позволяет использовать их в качестве практичного решения для исследования навигационного потенциала. В результате фиксации видеокамерой фактического изображения алгоритм сравнивает предсказанный образ с ожидаемым. Прогностический рендеринг организует направление активных исследований в области навигации

с использованием средств визуализации на основе корреляции обработки изображений между прогнозируемыми и истинными изображениями как допустимую степень совпадения двух изображений.

Позиционирование на базе компьютерных изображений может обеспечить высокую точность при применении характерных точек в зоне близкого расстояния. Аналогичным образом обнаруживаются и сопоставляются признаки между последовательными кадрами изображения, чтобы восстановить относительные изменения в положении и ориентации объектов. Типичные системы данного типа включают одновременное определение визуального местоположения и картографирование ландшафтного пространства навигационных данных. После объединения с инерциальными датчиками навигационная система с поддержкой изображений способна преодолевать ограничения и недостатки автономной системы. В конечном итоге объекты на относительных компьютерных изображениях сопоставляются с абсолютными объектами в реальном мире, координаты которых известны в навигационной среде. Результаты практических испытаний показали, что точность определения местоположения инерциальных встроенных датчиков с использованием изображений составляет примерно два сантиметра, даже если при визуализации доступна только одна характерная точка [18].

В визуальной морской навигации становится возможным реализовать новый подход к решению сложной задачи геолокации с использованием сопоставления изображений в структурированной базе данных эталонных графических сценариев. Обсервация в новой трактовке рассматривается как проблема кластеризации локальных объектов изображения взамен эвристических подходов. Структурный принцип инновационной навигации основан на корреляционных функциях, позволяющих фрагментарно сопоставлять изображения. Для каждого локального объекта на изображении запроса сравнения находятся его приблизительные ближайшие соседние геометрические фрагменты с последующей прогнозируемой перегруппировкой объектов из эталонных базовых изображений на основе использования кластеризации доминирующего набора визуализированных образов с максимальным совпадением контура графики. Методы, основанные на локальных характеристиках, определяют точное соответствие геометрических объектов как ориентиров в сцене слежения по нескольким оптическим кадрам.

Предлагаемый интегрированный подход может обладать потенциалом для относительно долговременной и точной морской навигации в качестве альтернативы GPS. Комбинированные системы будут непрерывно предоставлять пользователю точную информацию о местоположении, ориентации, скорости и хронометраже. Инновационные методы применения «сигналов возможностей» на основе усовершенствованных алгоритмов оппортунистической интеграции данных могут быть активно использованы в перспективе для решения сложных задач непрерывного морского позиционирования.

Результаты (Results)

Перспективным направлением реализации оппортунистической навигации в морских приложениях является автономная навигация подвижных объектов с использованием данных о гравитационном поле Земли. Автономные подводные аппараты традиционно используют инерциальную навигационную систему в качестве основного устройства для возможности выполнения долгосрочного плавания. В подводных ситуациях спутниковые методы навигации ограничены из-за сложности и изменчивости подводной среды. Гравитационно-инерциальная навигационная система, обеспечивающая высокоточное определение местоположения, является передовой технологией подводной навигации. Безальтернативность данного метода в качестве дополнения к инерциальной навигации при отсутствии сигналов спутниковых навигационных систем обуславливает его развитие в будущем [20]. Инерциальная навигационная система с гравитационным управлением представляет важную разработку в области автономной навигации подводных аппаратов.

Аналогичный вариант подводной навигации использует специальный алгоритм сравнения измерений гравиметром гравитационных аномалий в текущем положении с синтезированными данными гравитационного поля для постоянной коррекции положения подвижного объекта. Математический аппарат базисных сплайнов позволяет создать для оппортунистического способа навигации надежную

картографическую основу. Представляется целесообразным подход синтезирования геофизического графического профиля на основе методов сплайн-функций с целью повышения геометрической схожести аппроксимированной гравитационной поверхности для дальнейшего усиления точности позиционирования при использовании оппортунистической навигации в морских приложениях. В качестве объекта исследования используется смоделированная гравитационная карта, показанная на рис. 1 как слотовая репродукция из модели глобального гравитационного поля океана [21].

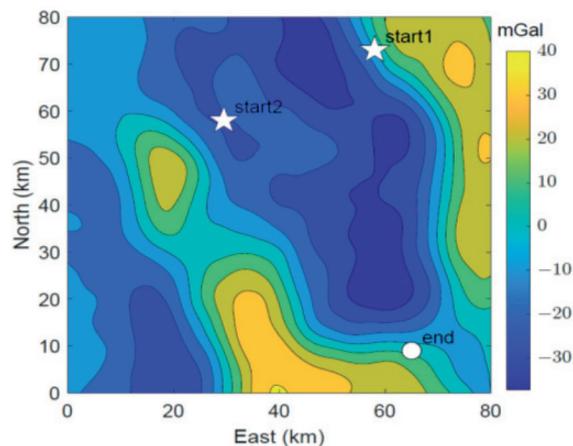


Рис. 1. Экспериментальная область смоделированной гравитационной карты океана

Причина, ввиду которой эта карта была экспериментальным образом синтезирована, заключается в том, что данный эталон картографирования обеспечивает информативность спрединга гравитационного поля выделенной в качестве примера географической области. Точность гравитационных данных выбранной экспериментальной области составляет 1,7 мГал. Максимальная гравитационная аномалия в регионе соответствует +40,8 мГал, минимальная — минус 37,2 мГал. Гравитационная аномалия содержит различные топографические особенности, такие как пики, склоны и равнины, которые оптимально подходят для анализа планирования геометрии маршрута. При фактических размерах 80 км по широте и 80 км по долготе пространственное разрешение интерполированной карты составляет в дистанции 1 км.

Выделенную географическую область удобно использовать для последующего прогнозирования в процессе планирования оптимальной траектории в дальнейшем возможном направлении исследования. Начальная точка маршрута (start1) на предполагаемом пути может быть, например, расположена в координатах (58,73 (см. рис. 1)). Путевая точка зафиксирована в пределах области подводного склона, где контурные линии распределены плотно, обеспечивая тем самым дополнительный фактор устойчивой ориентации. В качестве альтернативы можно предложить другую начальную точку (start2) в координатах (30,58 (см. рис. 1), расположенную на относительно пологом морском дне (в этом случае в исходном положении можно использовать минимум информации о гравитации). Как вариант, конечная точка маршрута (end) может находиться в координатах (65,9) для дальнейшего эксперимента по формированию безопасной маршрутизации. Следующее направление исследований планируется в эффективном нахождении набора траекторий в пределах определенного требования к погрешности, при котором мобильный объект может достичь более высокой точности позиционирования без строгого следования по определенной фиксированной траектории, тем самым повышая мобильность подводного транспортного средства, функционирующего на основе принципов оппортунистической навигации [22].

Информативные гравитационные области, показанные на рис. 2 в черно-белом варианте, учитываются как ориентиры для планирования оптимальной траектории в качестве маршрутизации в допустимой безопасной близости всплесков гравитационных аномалий с целью обеспечения эффективной ориентации [21]. Из-за неравномерного распределения гравитационного поля

характеристики согласования навигации неустойчиво меняются, когда подводные аппараты проходят через реальную морскую среду. Результаты натурных экспериментов показывают, что ориентирование по заданному направлению на фоне ландшафта информативных участков гравитационной карты может полностью обеспечивать сопоставимость графических изображений [23].

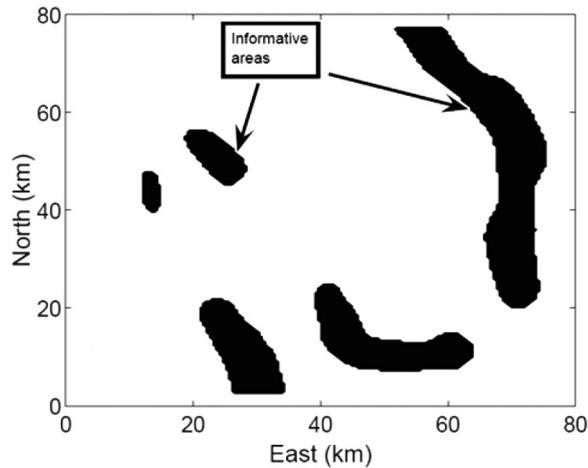


Рис. 2. Информативные участки планирования оптимальной траектории

Точность корреляции при подводной гравитационной навигации может быть увеличена на 40,39 % при использовании *итерационного метода оптимальной кольцевой точки* по сравнению с традиционным алгоритмом последовательного сопоставления контуров рельефа местности [24]. Гравиметрические измерения условно влияют на оптимальность запланированной траектории, так что фиксированная траектория может быть пройдена в рамках одной определенной морской миссии для достижения оптимальной точности навигации. Даже если реальная траектория отклоняется от запланированной на минимальную величину, имеется возможность получить высокую точность позиционирования на базе измерительной гравитационной информации. Инерциальная навигационная система с гравитационным управлением — это технология, использующая геофизическую информацию, которая имеет широкие перспективы применения, а алгоритм сопоставления гравитационной карты как ключевая процедура корреляционно-экстремальной навигации на инновационных принципах обеспечивает высокую точность позиционирования альтернативными средствами.

Предполагается, что сплайновая гравитационная модель представляет собой оптимальный картографированный эталон информативности в задаче оппортунистической навигации по аналогии с подобными вариантами корреляционно-экстремальной навигации [25]. Применение гибридной финитной модели позволяет оперативно обрабатывать избыточные массивы измерений навигационных параметров большой емкости в масштабе реального времени. При использовании математического аппарата кубических *B*-сплайнов достигается одновременно двойной эффект: повышение точности конечных результатов и организация высокоскоростных вычислений за счет оптимизации вычислительных затрат.

На основе данных проведенных вычислительных экспериментов доказана высокая точность расчетных операций до шестого порядка, т. е. шестого знака после запятой в расчете любого геофизического параметра при сплайновой компьютерной анимации навигационной изоповерхности любой степени сложности [26]. В случае восстановления навигационной изоповерхности на первый план выступают преимущества нетрадиционных для математических основ судовождения базисных сплайнов по наличию алгоритмической возможности экономии оперативной памяти бортового компьютера. Из-за конструктивной особенности базисной структуры *B*-сплайна объем хранимой навигационной информации сокращается в 4 раза по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции. Практическая применимость методов сплайн-функций в судовой

радионавигационной аппаратуре подтверждается актом о внедрении Московского конструкторского бюро «Компас» [27].

С целью демонстрации практической реализуемости сплайнового алгоритма в аспекте концепции оппортунистической навигации выполнена компьютерная визуализация картографического эталона информативности фиксированного фрагмента гравитационного поля океана согласно рис. 1 на основе гибридной *B*-сплайновой аппроксимации. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 9×9 с ключевыми данными по широте и долготе при общем количестве, равном восьми – десяти одной репродуцированной узловой точки (см. рис. 1) в соответствии с применяемой километровой координатной оцифровкой. С математической точки зрения рис. 3 является трехмерным представлением плоскостной карты поля гравитационных аномалий океана, представленной на рис. 1.

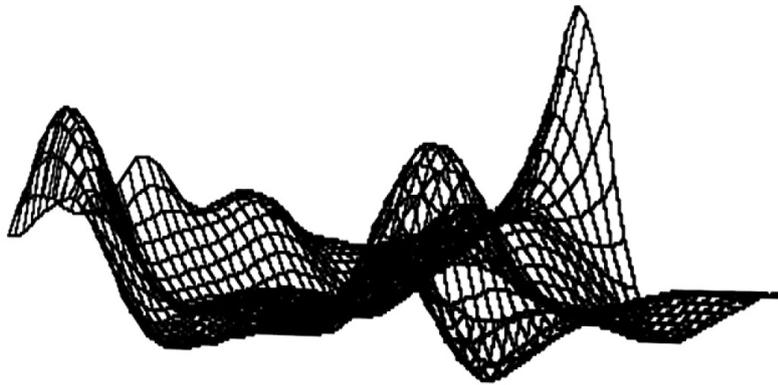


Рис. 3. Скриншот сплайн-аппроксимированной гравитационной карты

При сопоставлении рис. 1 и 3 явно определяется информационная идентичность. Тщательный анализ одного и того же изображения в разных форматах геометрической размерности подтверждает достоверность моделирования фрагмента гравитационного поля океана. Графический всплеск в средней части на отдаленной границе перспективы на рис. 3 соответствует максимуму аномалии гравитации $+40,8$ мГал в километровых координатах $(40,0)$ на нижнем плоскостном изображении (см. рис. 1). Ракурс диаметрально противоположного представления изображений в формате 2D и 3D выбран в целях лучшей наглядности перспективы трехмерного представления, так как в противном случае другие характерные участки изоповерхности будут графически неразличимы из-за затемнения на переднем плане скриншота объемной геометрической флуктуацией. Ступенчатая возвышенность с левой стороны рис. 3 синхронно соответствует кольцевым линиям максимальной оцифровки в мГал в светло-коричневых и желтых оттенках правой границы рис. 1 согласно принятой цветовой палитре.

С целью гладкого приближения продемонстрированного на рис. 3 трехмерного представления карты гравитационных аномалий использовались 30 добавочных точек по каждой координате на фрагментированном гридированном полигоне. Добавочные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов, согласно схеме Марседена, на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала для быстрого получения каждой дополнительной реперной точки.

Геометрический фактор синтезированной изоповерхности, позволяющий осуществить центровку компьютерного изображения в случае смещения граничных участков изоповерхности за фактические размеры экрана, был задан равным безразмерному значению 110 ввиду необходимости компенсации градации поля изменений гравитационной аномалии океана в диапазоне от $-37,2$ мГал до $+40,8$ мГал (см. рис. 1). Данный параметр обеспечивает дополнительное *математическое сглаживание* неоднородности синтезированных данных на перспективе трехмерной компьютерной визуализации.

Положительный результат моделирования, выполненного на основе фактической карты гравитационных аномалий, может быть использован в качестве достоверного эталона информативности для организации точного альтернативного позиционирования. Апробированный на методах сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу при реализации процедуры *корректируемого счисления*. Трехмерное картографирование с реализациями на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа расширяют горизонт ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации как процесса, выполняемого в сложных обстоятельствах плавания с применением элементов виртуальной реальности для возможности повышения надежности контроля местоположения за счет наглядности визуального ориентирования.

Обсуждение (Discussion)

Учитывая, что спутниковое позиционирование является движущим фактором большинства навигационных тенденций, фактически необходимо признать объективные ограничения GPS. Недостатки в работе ГНСС можно условно назвать «навигационным пробелом» («Navigation Gap»), схематично показанном на рис. 4 [28], где горизонтальная ось представляет континуум между городской / закрытой (Urban / Indoors) и сельской / открытой (Rural / Open) средой. Вертикальная ось приблизительно представляет высоту, начиная с уровня земли (Ground Level) и заканчивая космосом (Space). Устойчивая двумерная зона высокоточного надежного позиционирования условно обозначена сплошным синим цветом, но система GPS сама по себе недостаточна в смысле точности геолокации при приближении к левому нижнему углу рис. 4. Достижения в области высокочувствительного (High-sensitivity) GPS помогли уменьшить геометрический размер этого пробела в условно обозначенной на этом рисунке области фиолетовой текстурной формы. При этом все еще остается белый пробел в нижней левой части рисунка, где доступность, точность и надежность GPS сами по себе не соответствуют требованиям многих современных приложений. Альтернативный оппортунистический метод навигации может позволить восполнить условный «навигационный пробел» GPS в целях обеспечения непрерывного, точного и надежного позиционирования при любых обстоятельствах.

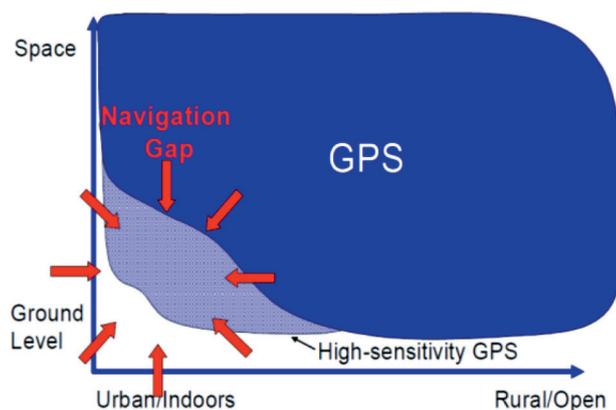


Рис. 4. Интерпретация понятия «навигационный пробел»

При использовании интегрированных сигналов объективно существует потенциал для большого разнообразия сигналов как по содержанию, так и по частоте. В зависимости от местоположения могут существовать десятки возможных для использования в целях навигации «сигналов возможностей». Источники таких сигналов могут функционировать в городских условиях, где пробел в навигации реализуется в проблемном «винтажном» виде.

Сложность практической реализации оппортунистической навигации заключается в том, что «сигналы возможностей» по оригинальному предназначению не оптимизированы для глобальной

навигации. В отличие от данных GPS, изначально передаваемых исключительно в целях позиционирования и хронометража, приложения комбинированных сигналов традиционно не разрабатывались для конкретных целей навигации. Одним из наиболее важных факторов является *атрибут времени*. Большинство наземных систем связи не синхронизированы по времени с точностью до нескольких наносекунд. Кроме того, доступность применения оппортунистической навигации зависит от географического местоположения. «Сигналы возможностей» не во всех случаях являются доступными по всему миру. Несмотря на то, что многие технические варианты оппортунистической навигации, как правило, гарантированно существуют в городских районах, точная природа этих сигналов может варьироваться в разных странах из-за различных стандартов радиовещания и связи. Также необходимо учитывать, что местоположение передатчика должно быть точно известно. Для того чтобы ориентироваться в использовании «сигналов возможностей», важно знать позиции передатчиков. Обычно относительно легко определить местоположение стационарных передатчиков. Однако если передатчики перемещаются, то они могут оказаться не столь полезными в качестве потенциального источника информации для навигации.

Внедрение комбинированной навигационной системы, основанной на стандартном базовом принципе «подключи и работай», требует дополнительного научного поиска и разработок в ключевых алгоритмах интеграции, а также в архитектуре аппаратного и программного обеспечения для эффективного конфигурирования разнородных физических датчиков с целью достижения точного и надежного позиционирования. Тем не менее указанные тактические технические сложности принципиально не препятствуют стратегическому применению оппортунистической навигации в глобальном масштабе. Помимо точного и надежного позиционирования можно получить информацию о скорости за счет технического ранжирования комбинированных сигналов. Скорость может быть практически определена путем измерения частоты или изменения фазы сигнала, если частота передачи сигнала точно фиксирована. Скорость может быть очень полезна в различных ситуациях, включая функционирование интегрированных систем, где ее можно использовать либо для ограничения дрейфа инерциальных систем как дополнительный информационный фактор, либо для реализации концепции обсервационного счисления.

В процессе инноваций навигационных технологий приходится так или иначе решать проблему «разрешения неоднозначности». В рамках проекта оппортунистической навигации становится возможным оптимальным образом справиться с указанной сложностью. В классическом варианте неоднозначность проявляется в необходимости устранения целочисленных неточностей в измерениях фазы несущей GPS для получения максимального уровня точности спутникового позиционирования. При использовании «сигналов возможностей» иногда также могут возникать неоднозначности в измерениях, основанных на разнице во времени прихода данных сигналов. Двусмысленности возникают при повторении во времени «сигналов возможностей». Очевидную неоднозначность легко исправить в процессе реализации концепции оппортунистической навигации, так как обычно существует хотя бы приблизительное представление о том, где находится приемник.

Главное, что важно понимать в процессе обработки интегрированной информации, это то, что приблизительное местоположение подвижного объекта является более точным, чем какая-либо двусмысленность. Например, в классическом судовождении данный факт, безусловно, выражен в концепции обсервационного счисления. Для ситуации аналогового телевидения было бы достаточно предположить, что навигационный потребитель находится в пределах разумного радиуса действия передающей вышки по аналогии с использованием в судовождении процедуры счисления для аналитического определения координат судна. Однако проблема более сложна в отношении других «сигналов возможностей», например, в передаче амплитудно-модулированного синусоидального несущего сигнала. Поскольку в данных в основном преобладает *несущая фиксированной частоты*, происходит значительное дублирование даже при изменяющейся амплитуде. Амплитудное радиовещание имеет длины волн приблизительно между 175–575 м, поэтому может оказаться невозможным узнать начальное положение мобильного объекта достаточно точно,

чтобы непосредственно определить ошибку неоднозначности, как в случае с телевидением. В данном случае, возможно, потребуется применение методов разрешения неоднозначности, аналогичных классически используемым в судовождении на основе близости к счислимому местоположению. В качестве поясняющей аналогии указанной проблемы оппортунистической навигации можно привести пример из классической навигации многозначности определения места судна по измеренным расстояниям до ориентиров в геометрической интерпретации пересечения в нескольких точках окружностей как изолиний дистанций.

Положительным фактором является то, что для статического стационарного радиоприемника при использовании фиксированных измерений разницы во времени прихода радиосигналов изменение геометрии траектории прохождения данных не происходит. Поэтому преимущества изменения геометрического фактора, наблюдаемые при использовании GPS из-за движущихся спутников, не будут критически сказываться в парадигме оппортунистической навигации. Перспективная схема обработки интегрированного сигнала основной полосы частот практически реализуется в течение двух этапов без необходимости получения какой-либо предварительной информации о местоположении. На первом этапе выполняется грубая оценка частоты и группировка тонов для каждого типа сигнала, на втором — дается уточненная оценка частоты на основе новой идеи когерентного объединения всех обнаруженных тонов [29].

Геолокация в закрытых помещениях в условиях высокой урбанизации оценивается как «навигационный пробел», в том смысле, что ГНСС в настоящее время надежно не функционирует и использование «сигналов возможностей» является одним из перспективных способов восполнить этот пробел в глобальной навигации. Для реализации концепции оппортунистической навигации доступно большое разнообразие сигналов, многие из которых передаются с мощностью, намного превышающей мощность GPS, что повышает способность точного позиционирования внутри зданий. Чтобы реализовать навигацию будущим обязательным условием является осуществление технического сотрудничества в области пакетной радиосвязи, восприятия, коммуникации, вычислений, хранения данных, контроля, принятия решений и обратной связи, причем необходимо эффективно содействовать развитию интегрированных сенсоров, мобильной связи 5G, интернета вещей, обработки больших объемов данных, облачных формализаций и аналогичных перспективных технологий [30]. Предлагаемый подход альтернативным образом повышает надежность позиционирования морских подвижных объектов в сложных условиях.

В морских приложениях практическое использование «сигналов возможностей» с учетом фактора «навигационного пробела» может позволить повысить стандарты безопасности судовождения за счет нивелирования локальной недееспособности ГНСС при наличии реальной возможности противодействия злоумышленному перехвату контроля управления судами.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Примеры экспериментальных данных подтверждают приблизительную корреляцию точности GPS и показателей погрешности навигации на основе комплексирования интегрирования разнородных данных. Представляется возможным последующее снижение погрешностей оппортунистической навигации за счет улучшения визуализации картографирования ландшафта «сигналов возможностей».
2. Локальная недееспособность современных спутниковых систем с позиций постулата «навигационного пробела» является мотивирующим стимулом поиска альтернативных способов местоопределения в концепции максимального интегрирования различных данных.
3. Фактор целостности определен как критерий для оценки надежности навигационной информации в системе мониторинга на основе технического оппортунизма для обеспечения позиционирования в режиме реального времени.
4. Апробирован подход *B*-сплайновой аппроксимации для реализации задачи одновременной геолокации и трехмерного графического отображения движения судна в трехмерном пространстве

координат с положительными результатами вычислительных экспериментов по точности и быстродействию расчетов.

5. Модификация пакета прикладных паскаль-программ применительно к задаче сплайновой компьютерной анимации картографического аспекта оппортунистической навигации обеспечивает вычислительную устойчивость расчетных процедур в неаффилированной с зарубежным программным обеспечением графической среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peshekhonov V. G.* High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data / V. G. Peshekhonov // Gyroscopy and Navigation. — 2022. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.

2. *Ююкин И. В.* Сплайновый эталон картографированной информативности корреляционно-экстремальной навигации как потенциал кибернетической ситуационной осведомленности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.

3. *Grejner-Brzezinska D. A.* Multisensor navigation systems: A remedy for GNSS vulnerabilities? / D. A. Grejner-Brzezinska, C. K. Toth, T. Moore, J. F. Raquet, M. M. Miller, A. Kealy // Proceedings of the IEEE. — 2016. — Vol. 104. — Is. 6. — Pp. 1339–1353. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2528538.

4. *Merry L. A.* Comparison of Opportunistic Signals for Localisation / L. A. Merry, R. M. Faragher, S. Scheding // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 16. — Pp. 109–114. DOI: 10.3182/20100906-3-IT-2019.00021.

5. *Kassas Z. M.* Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium / Z. M. Kassas, S. Kozhaya, H. Kanj, J. Saroufim, S. W. Hayek, M. Neinavaie, N. Khairallah, J. Khalife // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). — IEEE, 2023. — Pp. 338–343. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140066.

6. *Gao Y.* Ranging technology using signals of opportunity of non-cooperative communication satellites / Y. Gao, Y. Hua, Y. Xiang, C. Huang, S. Wang, X. Zhao // The Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 2. — Pp. 488–500. DOI: 10.1017/S0373463320000600.

7. *Fisher K. A.* The Navigation Potential of Signals of Opportunity-Based Time Difference of Arrival Measurements: PhD Diss / K. A. Fisher. — Ohio: Wright-Patterson AFB, 2005. — 257 p.

8. *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.

9. *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.

10. *Morales J. J.* Event-Based Communication Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM / J. J. Morales, J. J. Khalife, Z. M. Kassas // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2023. — Vol. 59. — Is. 2. — Pp. 1624–1642. DOI: 10.1109/TAES.2022.3220722.

11. *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.

12. *Khalife J.* Opportunistic Autonomous Integrity Monitoring for Enhanced UAV Safety / J. Khalife, M. Maaref, Z. M. Kassas // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. — 2023. — Vol. 38. — Is. 5. — Pp. 34–44. DOI: 10.1109/MAES.2022.3178664.

13. *Gopaul N. S.* Optimal Image-Aided Inertial Navigation: PhD Diss. / N. S. Gopaul. — Toronto: York University, 2018. — 241 p.

14. *Veth M. J.* Image-Aided Navigation — Concepts and Applications / M. J. Veth, J. F. Raquet // Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications. — John Wiley & Sons Inc., IEEE Press, 2020. — Vol. 2. — Pp. 1571–1595. DOI: 10.1002/9781119458555.ch50.

15. Yuyukin I. V. Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — No. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.

16. Alchinov A. I. Analysis of Stress Exposures on Autonomous Navigation Conditions in Search Correlation-Extreme Navigation Systems / A. I. Alchinov, I. N. Gorokhovskiy // Problemy Upravleniya. — 2022. — Is. 6. — Pp. 42–58. DOI: 10.25728/pu.2022.6.5.

17. Venable D. T. Large scale image aided navigation / D. T. Venable, J. F. Raquet // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2016. — Vol. 52. — Is. 6. — Pp. 2849–2860. DOI: 10.1109/TAES.2016.150603.

18. Jiang W. High-precision image aided inertial navigation with known features: observability analysis and performance evaluation / W. Jiang, L. Wang, X. Niu, Q. Zhang, H. Zhang, M. Tang, X. Hu // Sensors. — 2014. — Vol. 14. — Is. 10. — Pp. 19371–19401. DOI: 10.3390/s141019371.

19. Ююкин И. В. Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.

20. Peshekhonov V. G. Role of navigation technologies in mobile gravimeters development / V. G. Peshekhonov / V. G. Peshekhonov, A. V. Sokolov, L. K. Zheleznyak, A. D. Bereza, A. A. Krasnov // Gyroscopy and Navigation. — 2020. — Vol. 11. — Pp. 2–12. DOI: 10.1134/S2075108720010101.

21. Wang B. Path Planning Method for Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation Based on PCRB / B. Wang, T. Cai // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 5. — Pp. 993. DOI: 10.3390/jmse11050993.

22. 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.

23. Wang B. A Filtered-Marine Map-Based Matching Method for Gravity-Aided Navigation of Underwater Vehicles / B. Wang, Z. Ma, L. Huang, Z. Deng, M. Fu // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2022. — Vol. 27. — Is. 6. — Pp. 4507–4517. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3159596.

24. Zhao S. Improving Matching Accuracy of Underwater Gravity Matching Navigation Based on Iterative Optimal Annulus Point Method with a Novel Grid Topology / S. Zhao, W. Zheng, Z. Li, A. Xu, H. Zhu // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — Is. 22. — Pp. 4616. DOI: 10.3390/rs13224616.

25. 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.

26. Ююкин И. В. Применение метода сплайн-функций при компьютерной визуализации подводного рельефа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.

27. Ююкин И. В. Алгоритмизация навигационных задач на основе методов кусочных аппроксимаций: дис. ... канд. техн. наук / И. В. Ююкин. — Л., 1991. — 119 с.

28. Miller M. M. Navigation in GPS Denied Environments: Feature-Aided Inertial Systems / M. M. Miller, A. Soloviev, M. Uijt de Haag, M. Veth, J. Raquet, T. J. Klausutis, J. E. Touma // Air Force Research Laboratory. — EGLIN AFB, 2010. — Pp. 1–32. DTIC ADA581023.

29. Yang C. Starlink Doppler and Doppler Rate Estimation via Coherent Combining of Multiple Tones for Opportunistic Positioning / C. Yang, A. Soloviev // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). — IEEE, 2023. — Pp. 1143–1153. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140055.

30. Yang X. Unmanned Visual Localization Based on Satellite and Image Fusion / X. Yang // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2019. — Vol. 1187. — No. 4. — Pp. 042026. DOI: 10.1088/1742-6596/1187/4/042026.

REFERENCES

1. Peshekhonov, V. G. “High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data.” *Gyroscopy and Navigation* 13.1 (2022): 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.

2. Yuyukin, Igor V. “Spline standard of mapped informativeness of correlation-extreme navigation as the potential of cybernetic situational awareness.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 374–392. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-374-392.
3. Grejner-Brzezinska, Dorota A., Charles K. Toth, Terry Moore, John F. Raquet, Mikel M. Miller, and Allison Kealy. “Multisensor navigation systems: A remedy for GNSS vulnerabilities?.” *Proceedings of the IEEE* 104.6 (2016): 1339–1353. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2528538.
4. Merry, Laura A., Ramsey M. Faragher, and Steve Scheduling. “Comparison of Opportunistic Signals for Localisation.” *IFAC Proceedings Volumes* 43.16 (2010): 109–114. DOI: 10.3182/20100906-3-IT-2019.00021.
5. Kassas, Zaher M., Sharbel Kozhaya, Haitham Kanj, Joe Saroufim, Samer W. Hayek, Mohammad Neinavaie, Nadim Khairallah, and Joe Khalife. “Navigation with Multi-Constellation LEO Satellite Signals of Opportunity: Starlink, OneWeb, Orbcomm, and Iridium.” *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2023. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140066.
6. Gao, Yuanyuan, Yu Hua, Yu Xiang, Changjiang Huang, Shanhe Wang, and Xian Zhao. “Ranging technology using signals of opportunity of non-cooperative communication satellites.” *The Journal of Navigation* 74.2 (2021): 488–500. DOI: 10.1017/S0373463320000600.
7. Fisher, Kenneth A. The Navigation Potential of Signals of Opportunity-Based Time Difference of Arrival Measurements. PhD Diss. Ohio: Wright-Patterson AFB, 2005. DTIC: ADA442340.
8. 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.
9. 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.
10. Morales, Joshua J., Joe J. Khalife, and Zaher M. Kassas. “Event-Based Communication Strategies for Collaborative Inertial Radio SLAM.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 59.2 (2023): 1624–1642. DOI: 10.1109/TAES.2022.3220722.
11. 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.
12. Khalife, Joe, Mahdi Maaref, and Zaher M. Kassas. “Opportunistic Autonomous Integrity Monitoring for Enhanced UAV Safety.” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 38.5 (2023): 34–44. DOI: 10.1109/MAES.2022.3178664.
13. Gopaul, Nilesh S. Optimal Image-Aided Inertial Navigation. PhD Diss. Toronto: York University, 2018.
14. Veth, Michael J., and John F. Raquet. “Image-Aided Navigation — Concepts and Applications.” *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*. Vol. 2. John Wiley & Sons Inc., IEEE Press, 2020. 1571–1595. DOI: 10.1002/9781119458555.ch50.
15. Yuyukin, I.V. “Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation.” *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0102916.
16. Alchinov, Aleksandr Ivanovich, and Igor’ Nikolaevich Gorokhovskiy. “Analysis of stress exposures on autonomous navigation conditions in search correlation-extreme navigation systems.” *Problemy Upravleniya* 6 (2022): 42–58. DOI: 10.25728/pu.2022.6.5
17. Venable, Donald T., and John F. Raquet. “Large scale image aided navigation.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 52.6 (2016): 2849–2860. DOI: 10.1109/TAES.2016.150603.
18. Jiang, Weiping, Li Wang, Xiaoji Niu, Quan Zhang, Hui Zhang, Min Tang, and Xiangyun Hu. “High-precision image aided inertial navigation with known features: observability analysis and performance evaluation.” *Sensors* 14.10 (2014): 19371–19401. DOI: 10.3390/s141019371.
19. Yuyukin, Igor V. “Correlation-extreme navigation through geophysical fields based on the use of spline technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.
20. Peshekhonov, V.G., A. V. Sokolov, L. K. Zheleznyak, A. D. Bereza, and A. A. Krasnov. “Role of navigation technologies in mobile gravimeters development.” *Gyroscopy and Navigation* 11 (2020): 2–12. DOI: 10.1134/S2075108720010101.
21. Wang, Bo, and Tijing Cai. “Path Planning Method for Underwater Gravity-Aided Inertial Navigation Based on PCRB.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.5 (2023): 993. DOI: 10.3390/jmse11050993.

22. 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.
23. Wang, Bo, Zixuan Ma, Liu Huang, Zhihong Deng, and Mengyin Fu. “A Filtered-Marine Map-Based Matching Method for Gravity-Aided Navigation of Underwater Vehicles.” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 27.6 (2022): 4507–4517. DOI: 10.1109/TMECH.2022.3159596.
24. Zhao, Shijie, Wei Zheng, Zhaowei Li, Aigong Xu, and Huizhong Zhu. “Improving Matching Accuracy of Underwater Gravity Matching Navigation Based on Iterative Optimal Annulus Point Method with a Novel Grid Topology.” *Remote Sensing* 13.22 (2021): 4616. DOI: 10.3390/rs13224616.
25. 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.
26. Yuyukin, Igor V. “Application of the spline-functions method in underwater relief computer visualization.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.
27. Yuyukin, I. V. *Algoritmizatsiya navigatsionnykh zadach na osnove metodov kusochnykh approksimatsii*. PhD Diss. L., 1991.
28. Miller, Mikel M., Andrey Soloviev, Maarten Uijt de Haag, Michael Veth, John Raquet, Timothy J. Klausutis, and Jimmy E. Touma. “Navigation in GPS Denied Environments: Feature-Aided Inertial Systems.” *Air Force Research Laboratory*. EGLIN AFB, 2010. DTIC ADA581023.
29. Yang, Chun, and Andrey Soloviev. “Starlink Doppler and Doppler Rate Estimation via Coherent Combining of Multiple Tones for Opportunistic Positioning.” *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2023. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140055.
30. Yang, Xiaodan. “Unmanned Visual Localization Based on Satellite and Image Fusion.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1187. No. 4. IOP Publishing, 2019. DOI: 10.1088/1742–6596/1187/4/042026.

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 11 июля 2023 г.
Received: July 11, 2023.