

SPLINE RECONSTRUCTION OF THE INFORMATIVENESS TEMPLATE IN CORRELATION-EXTREME NAVIGATION TASKS

I. V. Yuyukin

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

The problem of correlation-extreme navigation is addressed based on the reconstructed spline template of informativeness, incorporating a priori information about the safe movement of vessels in conflict navigation spaces. The paper focuses on the practical implementation of intelligent ship motion control guided by the principle of analyzing the geophysical field geometry when enabling autonomous ship movement along an electronic spline trajectory. The study substantiates terrain-based navigation principles by comparing measured navigation parameters with a pre-created virtual informative template via an extreme correlation functional for continuous vessel location updates. An analysis of alternative positioning reveals the advantages and disadvantages of various autonomous map-aided navigation methods, emphasizing their potential accuracy. The hypothesis of spatial and surface field navigation as the sole alternative to satellite systems is examined. Alternative navigation is proposed as an assistive technology to complement traditional satellite positioning, ensuring maximum noise resistance and cybersecurity in operational situational awareness. Integrity monitoring is studied as a modern criterion for validating navigation information. The application of integrity is hypothesized to improve real-time iterative coordinate calculations in alternative positioning. A new procedure is developed to optimize grid approximation point distribution by determining the effective positions of sliding nodes. Computational implementation of a wide range of correlation-extreme navigation tasks is achieved through enhanced Pascal programs. The proposed algorithm, tested with spline function methods, provides harmonized assistance to navigators, extending situational awareness horizons for watch assistants navigating challenging scenarios.

Key words: electronic spline trajectory, informativeness template, map-aided navigation, assisting technology, situational awareness, integrity monitoring, validity.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Spline reconstruction of the informativeness template in correlation-extreme navigation tasks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253.

УДК 656.61.052

СПЛАЙНОВАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭТАЛОНА ИНФОРМАТИВНОСТИ В ЗАДАЧАХ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

И. В. Ююкин

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

Рассмотрено решение задачи корреляционно-экстремальной навигации на основе реконструированного сплайнового эталона информативности с учетом имеющейся априорной информации об особенностях безопасного перемещения судна в конфликтном навигационном пространстве. Акцентируется внимание на практической реализации интеллектуального управления движением судна на основе соблюдения принципа изученности геометрии геофизического поля при организации автономного движения судна по электронной сплайн-траектории. Приведено обоснование принципа ориентирования по рельефу местности как результата сравнения посредством экстремального функционала корреляции измеряемых навигационных параметров с предварительно созданным виртуальным эталоном информативности для постоянного обновления местоположения судна. Выявлены преимущества

и недостатки использования различных автономных вариантов картографической навигации в результате выполненного обзорного анализа проблематики альтернативного позиционирования в контексте исследования потенциала точности. Рассмотрена гипотеза о навигации по пространственным и поверхностным полям как единственной альтернативы спутниковым системам. Предлагается использовать альтернативную навигацию как ассистирующую технологию, дополняющую традиционное спутниковое позиционирование с целью достижения максимальной помехоустойчивости и кибербезопасности при практической реализации ситуационной осведомленности. Исследован мониторинг целостности как современного критерия доверительной оценки правдоподобной валидности обработки навигационной информации. Предположительно применение феномена целостности гарантирует практическое улучшение итерационного процесса расчета обсервованных координат для альтернативного позиционирования в режиме реального времени. Разработана процедура поиска оптимизации распределения сеточных точек аппроксимации, основанная на принципе определения эффективной позиции скользящего узла. За счет универсальности модернизированных паскаль-программ обеспечивается вычислительная реализация широкого класса задач корреляционно-экстремальной навигации. Апробированный на методах сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводителю для расширения горизонта ситуационного восприятия вахтенным помощником процесса навигации в сложных ситуациях.

Ключевые слова: электронная сплайн-траектория, эталон информативности, картографическая навигация, ассистирующая технология, ситуационная осведомленность, мониторинг целостности, валидность.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Сплайновая реконструкция эталона информативности в задачах корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253. — EDN OWLOHJ.

Введение (Introduction)

В рамках модели корреляционного навигационного процесса имеют приоритет задачи аппроксимации геофизического поля, обеспечивающие наилучшую коррекцию навигационных параметров, исследуются алгоритмы сопоставления измерений навигационных полей с их стандартными виртуальными изображениями на основе предварительных оценок информативности с синхронным поиском наилучшей в смысле безопасности траектории движения подвижного транспортного средства [1]. Задача аппроксимации фрагментарного картирования с точки зрения финальной точности позиционирования играет первостепенную роль в альтернативном способе навигации. На инновационном уровне решается задача так называемой *картографической навигации* по реконструированной карте геофизического поля, направленная на корректировку выходных данных с учетом априорной информации об особенностях безопасного перемещения мобильного объекта в конфликтном пространстве [2]. Выбор предварительной траектории зависит от анализа информативности на основе детального изучения изотропного навигационного поля для наискорейшего оперативного вычисления координат с учетом априорной и апостериорной информации с целью достижимости точного совпадения предварительной с исполнительной маршрутизацией.

Интеллектуальное управление перемещением судна по естественным геофизическим полям Земли различной природы понимается как *корреляционно-экстремальная навигация* вследствие математических особенностей обработки навигационной информации [3]. Построение новых систем навигации базируется на практическом применении корреляционного принципа с учетом функционального экстремума. Альтернативная навигация основана на обосновании метода расчета местоположения движущегося средства по вариативному потенциальному или поверхностному профилю поля измерений навигационных параметров при сопоставлении с эталонной картой аномалий естественного поля Земли, рассматриваемых как совокупность геофизических ориентиров с учетом реальной специфики местности в цифровой интерпретации.

Для надежного определения места транспортной единицы с использованием геофизических ориентиров необходимо, чтобы отличия аппроксимированных изогеометрических значений конкретной области геофизического поля были заметно меньше предельной точности масштаба реконструированной карты [4].

При использовании корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС) с визуализацией картографического сопровождения местоположение судна обновляется с помощью сравнения измеренных и эталонных образцов геофизического поля вдоль траектории движения мобильного объекта. КЭНС применяются для уточнения в автономном режиме сведений о геолокации, ориентации и других параметрах движущейся транспортной единицы с целью гарантированного удержания объекта на заданном маршруте. Навигация по пространственным и поверхностным геофизическим полям в сравнительной оценке с эталонами картографических реконструкций является перспективной альтернативой ГНСС. Принцип корреляционно-экстремальной навигации в судовождении заключается в том, что в процессе движения судна измеряемые параметры геофизического поля посредством математических критериев правдоподобия постоянно сравниваются с предварительно созданным виртуальным характеристическим эталоном, хранящимся в памяти бортового компьютера [5].

В приложении морской навигации при исследовании эффективности функционирования КЭНС фактически рассматривается применение алгоритмов комплексной обработки различных физических параметров, а также методов одновременного решения задач географической локализации и картографирования в виде так называемых *процедур привязки к местности*. В связи с этим маршрутизация объединяет задачи математического синтеза карты геофизического поля и ориентирования по изолиниям, вдоль которых востребованная реализация поля сохраняет постоянное параметрическое значение. Комбинированная задача программируемого плавания с непрерывным оцениванием картографированного эталона информативности с лучшей точностью, чем счисление пути судна, позволяет постоянно уточнять местоположение судна с помощью специальной бортовой навигационной системы при дискретном измерении параметров геофизического поля при их сопоставлении с дополнительными навигационными данными [6]. Результаты сравнения сосредоточены на интервале наблюдения, и координаты точки, в которой коррелированная разница между измеренными и эталонными значениями будет минимальна, принимаются за обсервацию в режиме слежения.

Эффективным аппроксиматором в вопросе практического использования КЭНС признаются сплайн-функции, обеспечивающие потерю точности корреляционного сопоставления эталонного и измерительного представления геофизического поля на 15–20 % меньше по сравнению с классическими математическими методами [7]. Конструктивный способ устранения осцилляций синтезированной изолинии как минимальной единицы композиции навигационной изоповерхности заключается в построении составной кривой, в которой кусочные полиномы низкой степени последовательно применяются для интерполяции групп характерных функциональных точек. Полученная в результате кусочно-полиномиальная функция в идеальном варианте будет непрерывной в смысле успешности функциональной дифференцируемости, но в общем случае может иметь разрывы некоторых производных в позициях «склейки» последовательных сплайновых сегментов.

Обеспечение стабильности маршрута абсолютно согласуется с физической реализуемостью точности удержания судна на заданном курсе, что является важнейшим фактором адаптивного управления автономного судовождения. Задача сглаживания пути для построения «гладкой» траектории, проходящей через цепь опорных точек, может быть решена оптимальным образом посредством применения *B*-сплайнов [8]. Основой для построения интеллектуального пути используется не составленный из локсодромий минимальный четырехотрезочный многозвенник ломаной линии при задействовании пяти контрольных путевых точек, а маршрутный «коридор» в виде интерактивной оболочки сглаживающего *B*-сплайна, конфигурацию которого формируют по принципу своевременного уклонения от навигационных препятствий [9].

В случае точных измерений навигационных параметров решается задача интерполяции, т. е. построения такой навигационной функции, которая в контрольных точках строго принимает значения навигационных параметров. Если погрешности измерений значительные, то решается задача аппроксимации как отыскание навигационной функции, имеющей плавный характер и проходящей в некоторой окрестности измеренных данных.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Аналитический обзор проблематики задач корреляционно-экстремальной навигации с учетом перспективных возможностей инновации.
2. Апробирование *B*-сплайнового алгоритма для моделирования картографического эталона информативности.
3. Исследование возможности применения феномена целостности данных как критерия доверия к навигационной информации в аспекте успешного функционирования любого варианта корреляционно-экстремальной навигации.
4. Разработка процедуры поиска оптимальной расстановки узлов аппроксимации.
5. Модификация пакета прикладного программного обеспечения синтезирования на основе методов сплайн-функций любых вариаций аномальных фрагментов геофизического поля для практических целей корреляционно-экстремальной навигации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Представляется логичным признать помехоустойчивым основанный на использовании информации о естественных геофизических полях Земли *метод корреляционно-экстремальной навигации* при сплайновой реконструкции эталона картографической информативности. Перспективный корреляционный метод отличается недостаточной разработанностью, ограниченным применением и уступчивой конкурентоспособностью по точности с глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС).

Основы алгоритмизации альтернативной навигации ориентированы на следующие виды геофизических полей: несколько глобальных поверхностных (поле рельефа земной поверхности и тепловой, оптический, радиолокационный контраст) и два потенциальных (геомагнитное и гравитационное поля) с обязательным выполнением условия точечного зондирования планетарных геофизических полей средствами специальной бортовой аппаратуры¹. Из двух потенциальных полей магнитное является более информативным по сравнению с гравитационным. При этом принципиальные особенности вариативности магнитного поля Земли осложняют его использование в интересах навигации ввиду неустойчивости во времени, вызванной магнитными бурями и геомагнитными пульсациями. Аномалии потенциального поля Земли могут быть использованы как основной источник информации для определения параметров движения мобильных объектов.

В ситуации кибернетической угрозы практически невозможно исказить сплайновый эталон картографированной информативности как визуализированную базовую экспозицию. Манипуляция графическими всплесками невозможна на основе зловерного оперирования математическими коэффициентами методом искусственных алгоритмических подстановок, так как в реальности в бортовом обеспечении программы заложено использование компилированных кодов, а не работа с файлами в исходных текстах языка программирования Pascal. Кроме того, уникальная математическая композиция сплайн-функций концептуально противодействует стороннему вмешательству злоумышленников. Таким образом, ни при каких обстоятельствах не нарушается классический процесс привязки измеренного фрагмента навигационного поля к опорному эталону, и тем самым обеспечивается автономное точное позиционирование подвижных объектов при попытках хакерских атак на целевой математический актив.

¹ Джанджгава Г. И. Навигация по геополям: научно-методические материалы в помощь разработчикам систем автономной навигации с использованием данных о геофизических полях. М.: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.

Главная причина устойчивости сплайновых конструкций заключается в кусочной математической архитектуре сплайна, когда локальные нарушения математической композиции не отражаются на общей задаче аппроксимации. Базисные финитные функции алгоритмически препятствуют злоумышленной трансформации многозвенной структуры. Кубический B -сплайн может быть выражен в виде разложения на набор многочленов на каждом пятикратном узловом полигоне сеточных контрольных точек. Пять опорных точек, характеризующих единичный кубический B -сплайн, алгоритмически минимизированы до числа базовых точек данного интерполянта, что позволяет непосредственно сформировать процесс оптимизации в глобальном масштабе, нивелируя возможные локальные искажения.

Кибернетическое преимущество изолинии, построенной при помощи B -сплайнов третьей степени, заключается в том, что изменение одной из характеристических точек линии равного значения навигационного параметра вызывает изменение только четырех соседних сегментов изолинии, что при спуфинговой атаке означает локальность корректировки формы без стратегической модификации общей изолинии, поскольку сплайн представляет собой вторичную абстракцию по отношению к оригинальной алгебраической кривой. Ассоциированный финитный сплайн, синтезирующий по пяти дискретным данным в каждом элементе сплайнового набора искусственную кусочную конструкцию, не заменяет фактическую интерполируемую кривую, но при этом формирует максимально близкую к реальности навигационную изолинию. В худшем варианте кибернетической атаки даже искаженный B -сплайн не препятствует последовательному соединению фрагментарных носителей без резких функциональных изменений и разрывов, что формирует реалистичную «склеенную» геометрическую форму в целом при любых геометрических неблагоприятных обстоятельствах.

Запланированная трансформация аппроксимации любой изолинии B -сплайном может быть обеспечена на основе применения устойчивых математических комбинаций с возможностью вычислений в масштабе реального времени. B -сплайновый подход позволяет генерировать алгебраическую кривую с меньшим отклонением от оригинала с меньшим количеством контрольных точек, обеспечивая при этом требуемую точность формы траектории. Основные особенности рассматриваемого метода проявляются в том, что при его реализации необходимо наличие опорной корректируемой навигационной системы, прецизионных датчиков и априорной информации о навигационном поле в виде цифровой карты, формализуемой по результатам заранее проведенной высокоточной съемки. Предполагается в рамках исследуемой проблемы модифицировать разработанный универсальный алгоритм на основе сплайновой технологии для высокоскоростного моделирования виртуальных карт с целью оперативного эталонного сравнения с фактическими измерениями навигационного поля в рамках проекта автономной морской навигации. Дополнительным фактором кибернетической неуязвимости является запрограммированная возможность целенаправленного варьирования группой масштабирующих коэффициентов на основе всестороннего понимания теории сплайн-функций при определении динамичности синхронного балансирования сплайновыми параметрами.

Мореходная астрономия как метод противодействия средствам радиоэлектронной борьбы основана на специальном тренинге судоводительского состава, при этом практикующие судоводители не имеют достаточных астронавигационных навыков. Традиционные методы получения независимой астрономической информации в условиях дефицита времени у судоводителя на вахте часто остаются не востребованными ввиду трудоемкости выполнения математических расчетов². Наличие на мостике в лучшем случае официального виртуального морского астрономического альманаха Sky Mate Pro или его вариативного аналога, обеспечивающего штурмана точной информацией для решения астронавигационных задач в море, можно рассматривать как исключительный случай. При практической работе с заменяющими звездный глобус таблицами

² Гагарский Д. А. Мореходная астрономия. М.: Морречцентр, 2014. 200 с.

типографского издания выявляются определенные фактические недостатки³. Кроме того, секстан не является в настоящее время обязательным конвенционным оборудованием, а, следовательно, выполнить обсервацию средствами мореходной астрономии не представляется возможным при отсутствии на борту инструмента.

Следует отметить, что правительство США официально оставляет за собой право оперировать режимом селективного доступа GPS для гражданских и военных потребителей. Гражданским потребителям открытый канал может быть технически деактивирован при сохранении исключительного доступа военным пользователям спутниковой системы в любом месте на земной поверхности. Региональное отключение GPS-сигналов гражданского диапазона в Ближневосточном регионе в условиях военного конфликта в Ираке в 1990–1991 гг. при проведении стратегической операции государств антииракской коалиции в зоне Персидского залива «Буря в пустыне» ранее уже использовалось. Эта технология достаточно отработана для того, чтобы ее можно было локально применять на практике повсеместно.

В условиях современности кибернетическая атака на GPS также становится абсолютной реальностью. ГНСС могут быть подверженными намеренной помехе глушения спутникового сигнала при ускоренном развитии специфичного оборудования. При помощи незаконного применения специальных технических средств можно организовать искажения реальных данных ГНСС в виде спуфинг-атаки на любой морской акватории: как в открытом море, так и в прибрежном плавании. Спуфинг-технология основана на модуляции псевдослучайного кода на частотах ГНСС с переориентированием судового приемника от слабого спутникового сигнала на фальсифицированный сильный сторонний сигнал [10]. Показательным примером является инцидент массового спуфинга у побережья Новороссийска. Согласно мотивированному сообщению капитана одного из двадцати атакованных судов, приемник GPS в течение нескольких дней позиционировал координаты в районе аэропорта Геленджика, в то время, когда судно, фактически, дрейфовало на расстоянии около 25 миль от побережья [11]. При этом автоматический спутниковый приемник фиксировал безопасную точность системы в пределах 100 м при индикации высоты судовой антенны 39 м под водой [12]. Самотестирование спутниковой аппаратуры проходило успешно, но это не меняло фактической ситуации. Ситуация некорректности работы ГНСС в Черном море является очевидным доказательством современной повсеместной реальности массового спуфинга [13]. Вследствие анализа приведенных фактов можно сделать вывод необходимости поиска решений реализации альтернативы ГНСС в виде практических приложений КЭНС в вопросах морской тематики.

КЭНС как ассистирующая навигационная система, дополняющая традиционную навигацию, отличаются помехоустойчивостью и кибербезопасностью. Дублирующая система позиционирования, основанная на измерениях параметров гравитационного поля, имеет абсолютную помехозащищенность ввиду невозможности злоумышленного создания искусственных гравитационных помех. Использование ассистирующей технологии способствует повышению помехоустойчивости радионавигационных систем ввиду того, что в концепции гравитационной или магнитной навигации никакие сигналы не излучаются и не принимаются извне, а, следовательно, альтернативные инновационные системы можно считать безопасными в кибернетическом смысле. При этом нивелируется такой критичный недостаток ГНСС, как минимальная устойчивость к радиотехническим помехам, обусловленная низким уровнем спутникового сигнала у поверхности Земли. Кроме того, не утрачивает своей актуальности проблема работы в условиях естественных и преднамеренных помех, включая спуфинговое изменение мощности сигналов от космических аппаратов, вплоть до их полного отключения. В случае отказа основной системы позиционирования резервный вариант автоматически переключается на прием навигационных данных в качестве практической реализации ассистирующей технологии.

³ Бруснецов В. П. Практическая мореходная астрономия. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. 120 с.

При исследовании перспективности альтернативного спутниковым системам навигации метода позиционирования представляется целесообразным применить концепцию кибернетической осведомленности в приложении успешного функционирования КЭНС для реалистичной оценки безопасности морского транспорта от непредсказуемого сценария угроз хакерских атак. Целесообразность онтологического инжиниринга основана на прогнозе достижимости эффекта абсолютной предсказуемости местоположения судна в локальной среде недееспособности спутниковых сигналов при практической реализации потенциала ситуационной осведомленности.

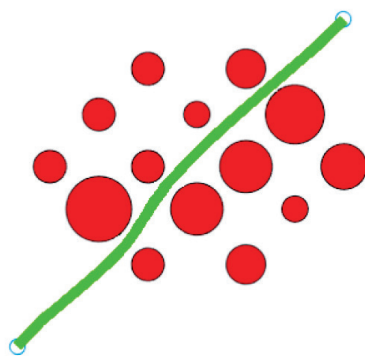
В парадигме современного планирования перехода движение судна выполняется по кратчайшей траектории в обход набора геометрически замкнутых выпуклых множеств навигационных препятствий без учета влияния гидрометеорологических факторов. Успешное решение задач альтернативного судовождения зависит от умения судоводителей выбирать эффективную стратегию планирования маршрута как поиск оптимальной траектории на основе реализации функции потенциала отталкивания путевых точек маршрута за пределы контура уязвимых от опасностей запретных районов плавания как противодействие угрозе безопасности [14]. При этом допускаются тактические изменения маршрутизации как последствие несовпадения предварительного и исполнительного планов перехода по причине воздействия гидрометеорологических факторов с осознанным допущением увеличения пройденного расстояния.

На основе полной информации о начальной и целевой позициях маршрута необходимо оптимальным образом выбрать путь, свободный от столкновений с препятствиями, исходя из предположения о вероятностном существовании минимального расстояния между различными опасностями, обеспечивающего безопасный проход подвижного объекта [15]. В результате электронного подъема карты как реализации графического представления конфликтности навигационной среды в виде контуров окружностей разного размера оптимизируется математическое решение с учетом различных критериев для получения эффективного пути следования судна относительно ограничительных препятствий. В алгоритме моделирования оптимального сплайн-пути следует учитывать апостериорную способность аппроксиматора генерировать траекторию без навигационных столкновений с препятствиями в режиме реального времени. В ситуации с элементами искусственности предварительной прокладки судоводитель может изначально не обладать полными знаниями о конфликтности навигационной среды, что впоследствии, безусловно, спровоцирует несовпадение предварительной и исполнительной прокладок. Подход к планированию траектории на основе использования концепции информативности навигационного поля, в которой физические препятствия представлены отталкивающими окружностями, является перспективным. Алгоритм планирования траектории на основе сплайн-функций позволяет обеспечить стратегическую минимизацию длины пути, его плавности с учетом многофакторности критериев безопасности за счет возможности быстрого динамического переконфигурирования геометрии маршрута в случае, если изначально автономный выбранный путь становится нецелесообразным по причине воздействия гидрометеорологических факторов.

Прагматичный алгоритм традиционно рассматривает стандартную маршрутизацию судна в двумерном конфигурационном варианте, где навигационные препятствия представлены в виде конечной группы непересекающихся окружностей разного размера, как показано на рисунке (с. 240). Цветовая палитра использована для каждого одиночного круга как степени соответствия опасности уязвимого района плавания в конфликтном поле навигационной среды. Так, например, красный цвет в «менталитете» штурмана привычно ассоциируется с атрибутом No Go Area как графическим показателем высокого риска опасности следования судна в недопустимой близости контурного круга отталкивания от запретного района.

При апостериорной оценке точности местоположения фиксируется минимальное расстояние линии пути от навигационных препятствий с учетом средней квадратической погрешности (СКП) как фактической реализации затратной функции. Зеленый цвет траектории символизирует безопасность маршрута. Предварительный маршрут в зеленом цвете безопасности оптимизируется вариативностью «гладкости» применяемой сплайн-функции с явным признаком

успешной дифференцируемости аналитического функционала. Оригинальный метод, основанный на сплайн-функциях, позволяет получить «гладкую» траекторию без столкновений с препятствиями для любой сложности навигационной среды. Поэтому представляется логичным каждую опасность условно обозначить отдельным кругом красного цвета при неукоснительном выполнении математического условия определения недопустимого кратчайшего сближения, позволяющего гарантированно обеспечить поиск *зеленого коридора безопасности* для движущегося по траектории судна (см. рисунок). Многообразие геометрии физических препятствий может быть априорно зафиксировано конечным набором непересекающихся окружностей. Различная степень опасности навигационных препятствий описывается диаметром круга запретного района плавания. Радиус круга является аналогом понятия веса навигационного препятствия с целью реализации максимальной вероятности заблаговременного маневрирования от уязвимой зоны за счет уклонения от геометрии красного контура опасности.



Парадигма планирования перехода
в обход замкнутых множеств навигационных препятствий [16]

Представленная на рисунке гипотетическая ситуация распределения навигационных препятствий демонстрирует сконцентрированный внутри каждой окружности групповой набор навигационных ограничений различной степени опасности. На электронной карте покрывающие запретные зоны окружности с текстурно-цветовой красной заливкой периметра можно оперативно обозначить при использовании редактора ручной корректуры с учетом СКП навигационной функции. Расчет СКП выполняется по классической формуле математических основ судовождения как квадратный корень из суммы квадратов СКП навигационных параметров, умноженных на частные производные функциональных аргументов. Совместное действие случайной и систематической погрешностей измерений интерпретируется как дополнительное приращение навигационной функции.

В ситуации высокой вероятности сближения с препятствием на дистанцию, сопоставимую с трехкратным значением СКП, задействуется *метод рационального решения обхода навигационного препятствия с противоположной стороны* за счет реализации перестроения сплайновой геометрии. Процедура оптимизации распространяется только на те точки траектории, которые определяют ее сплайн за счет реализации феномена плавности, в то время как при исследовании фактора минимизации пути учитываются все точки маршрута. Интеллектуальный сплайн, формирующий траекторию, оперативно перестраивается на каждой итерации с использованием апостериорной информации об увеличении степени риска запланированной маршрутизации. Процесс алгоритмизации завершается, если количество итераций превышает заданный пользователем предел или если новая итерация не улучшает предыдущую. Экспериментальное сравнение на основе нескольких тысяч тестов показало, что сплайновый алгоритм оптимизации пути требует в среднем на 10 % меньше итераций, чем любой альтернативный математический подход при гарантированной успешности нахождения безопасного маршрута в восемнадцати различных моделируемых навигационных средах [17].

Точность корреляционно-экстремального подхода зависит от информативности выбранного участка поля навигационных измерений, его предельной изменчивости, уровня погрешностей датчиков и предельной точности масштаба карты, априорной неопределенности в знании текущих координат местоположения предсказательного моделирования процесса навигации в конфликтной неструктурированной среде. При использовании в морской навигации поля аномалий земной гравитации, ввиду стабильности и возможности измерений с помощью хорошо разработанных инерциальных датчиков в виде высокоточных акселерометров и гравиметров, ведутся интенсивные исследования по вопросу оценки практической точности нестандартной обсервации.

Погрешность первоначальной плановой процедуры «привязки к местности» на основе измерений бесплатформенных инерциальных навигационных систем как основы комплексной системы навигации первоначально составляла 200–500 м без учета возможности формирования векторных карт по высокоточным съемкам [18]. В отличие от модульных карт, где каждая точка пространства характеризуется одним параметром вектора магнитной индукции, в векторных картах каждая точка пространства фиксируется главной, региональной и аномальной составляющими. Неточности векторного представления рельефа местности не превышают погрешности исходного картографического материала. Указанные компоненты, являясь статистически независимыми, позволяют повысить потенциальную точность нетрадиционной навигации.

В первоначальных экспериментах на информативных участках магнитного поля проводилось имитационное исследование с учетом погрешности бортовых измерений и картографирования с учетом принятых вариаций на уровне 50–100 нТл. При начальных позиционных экспериментах достигалась точность оценки местоположения в пределах одного дискрета навигационного поля с показателем 500 м [18]. Согласно сопоставимым данным ФГУП «ВНИИФТРИ» (Менделеево), величина достижимой погрешности навигации по геофизическим полям в первых экспериментах составила 540 м на основе использования программно-математической модели макета аппаратуры пятилетней давности при оценке совместной обработки гравитационных и магнитных измерений [19]. По данным натурных экспериментов концерна ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт-Петербург), показатели точности вычисления координат в условиях современности улучшились практически десятикратно до диапазона 50–70 м при условии применения в обработке корреляционно-экстремальной информации надежных алгоритмов фильтрации [20]. Кроме того, на тестовом компьютере при усреднении по времени 250 запусков позиционных решений было определено, что для обработки всех измерений при реализации *субоптимального алгоритма* альтернативного позиционирования необходим допустимый минимум времени, равный 30 с. При абсолютной степени картографической изученности гравитационного и магнитного полей в детальности и информативности аномальных компонент геофизики Земли существуют вариационные отличия в зависимости от топографических особенностей района местности. Поэтому точность навигации в настоящее время колеблется от десятков до сотен метров.

Предварительный анализ потенциальных полей ориентирован на выделение различных локальных аномалий, являющихся важными источниками информации для навигационных определений местоположения. Аномальная составляющая геофизического поля для формирования эталона информативности выделяется *методом формирования измерительных функциональных приращений* на соответствующей дискретности корреляции [21]. При точечном зондировании геофизического поля решение о местоположении принимается после прохождения определенного интервала, величина которого зависит от точности картографирования и погрешностей физических бортовых измерений. Например, в зависимости от высоты полета летательного аппарата и морфологии местности дискретность корреляции меняется в пределах 10–25 км при скорости 10–12 км/мин. Вследствие этого проход интервала корреляции для воздушного транспортного средства займет около 2 мин для получения надежной обсервации [18]. При существующих скоростных показателях морских судов проблема оперативной «привязки к местности» теряет критичный характер по фактору времени. Особенность задач коррекции показаний морских навигационных систем заключается в длительном характере процедуры

коррекции, что обусловлено, в том числе, недостаточно высокой скоростью движения морских объектов и, соответственно, необходимостью учета изменчивости оцениваемого вектора состояния, который включает ошибки оценки навигационных параметров [22].

КЭНС переходит из слежения в режим накопления информации в ситуации превышения допустимых координатных значений горизонтальной или вертикальной неопределенности в качестве дополнительных уровней защиты, сравниваемых с соответствующими им аварийными пределами. При этом бесплатформенные инерциальные навигационные системы становятся недоступными для выполнения коррекции координат и летчику целесообразно некоторое время дополнительно пилотировать над пересеченным ландшафтом с целью «привязки» к местности. В результате практического использования феномена информативности КЭНС возвращается в режим слежения при фиксации высокой достоверности в точности определения координат. Эффективный выбор подходящего района в смысле информативности имеет решающее значение для корреляционно-экстремальной навигации. При решении проблемы информативности особый интерес представляет алгоритм расширенного поиска экстремумов по всему геофизическому полю, основанный на адаптивном пороговом значении для выбора подходящего района.

С целью апробации нового подхода был проведен успешный эксперимент по точности сопоставления картографических изображений в арктических областях на основе данных о гравитационных аномалиях. Алгоритм использует значения градиентных характеристик, полученные с помощью вычисления свертки параметров расширенного экстремума для всего поля и данных справочной карты силы тяжести, чтобы детально охарактеризовать изменяющиеся характеристики гравитационного поля. На основе метода адаптивного порога могут быть заданы различные предельные значения градиента в соответствии с данными о силе тяжести в различных зонах тестирования как вариации критерия выбора подходящих областей геофизического поля с высокой степенью пригодности к задачам пассивной инерциальной навигации. Точки данных с градиентами, превышающими указанный порог, идентифицируются как локальные точки областей сопоставления для учета изменяющихся характеристик гравитационного поля. В качестве подходящей для тестирования выбирается информативная область с большим количеством так называемых *кандидатских точек*. Для проведения имитационных экспериментов были выбраны девять репрезентативных районов в Северном Ледовитом океане с различными характеристиками изменения силы тяжести в целях проверки эффективности предложенного алгоритма для улучшения навигационных характеристик всей системы альтернативного позиционирования. Имитационные эксперименты показали, что в выбранных районах, где доля локальных точек достигает 70 %, с помощью алгоритма расширенного поиска экстремумов можно получить положительные результаты определения местоположения с учетом технических возможностей инновационного направления навигации [23].

При выборе подходящих областей для сопоставления с целью оперативной «привязки» к рельефу местности важно заранее точно определить географические области, в которых наблюдается существенное изменение значения гравитационной аномалии. Коррекция инерциальных систем навигации основана исключительно на сопоставлении информации, передаваемой от датчика геофизического поля, с эталонной картой данного поля для выявления степени близости измеренного профиля рельефа местности с хранящимся в памяти бортовой вычислительной системы эталонным профилем. Вследствие этого обоснованным является применение нестандартных подходов к заблаговременному оптимальному картированию эталонов местности во избежание потери обсервации при локальном отсутствии информативности навигационного поля. В картографической области, в условиях слабого гравитационного поля, доступная эффективная информация о гравитационном поле становится незначительной, и трудно получить точные результаты сопоставления в поддержку процедуры «привязки», что снижает навигационные характеристики автономной системы. Обоснованный предварительный выбор подходящего района сопоставления оказывает непосредственное влияние на финальные навигационные характеристики в иерархии эффективного функционирования навигационной системы.

Для теоретического повышения точности определения координат подвижных мобильных объектов представляется целесообразным использовать в судовождении потенциал концепции максимального интегрирования разнородных датчиков для непрерывного высокоточного местонахождения на основе микширования всевозможных радиочастотных сигналов с параллельной визуализацией электронного картографирования [24]. Объединение датчиков различных модальностей позволяет получать статистически более точные данные при реализации современных картографических решений для получения точного представления об окружающей среде [25]. Новая парадигма преодоления уязвимостей глобальной навигации заключается в максимальном комплексировании различных приемников с широким спектром радиочастотных сигналов в качестве дополнительной навигационной информации к возможностям ГНСС взамен критического исключения спутниковых систем с целью однозначного перехода к альтернативному позиционированию.

Исключительное использование ГНСС 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 запасной помехоустойчивый вариант позиционирования возможно при использовании альтернативных средств навигации. В неблагоприятный момент, когда ГНСС становятся недоступными, подвижные объекты для успешного продолжения навигации могут использовать максимальную интеграцию сенсорных систем в рамках совместной радиосвязи с одновременным электронным картографированием.

Эксперимент, демонстрирующий компромисс между точностью геолокации и концентрацией данных позиционирования, выявил, что итоговая ошибка локализации после 30 с отсутствия GPS была уменьшена по сравнению с использованием только классических инерциальных систем с 55 м до 6 м при применении комбинированного варианта навигации [26]. Интегрированная навигационная система с несколькими датчиками имеет решающее значение для повышения непрерывности и точности определения местоположения в интеллектуальных транспортных системах. Глобальная система позиционирования (GPS) с учетом показателей китайской спутниковой системы BeiDou System (BDS) с инерциальным измерительным блоком (Inertial Measurement Unit (IMU)) при визуальной одометрии (Visual Odometry (VO)) являются широко используемыми современными датчиками благодаря возможности их взаимного дополнения. В сложных навигационных условиях многолучевые помехи, отсутствие прямой видимости и недостаточное количество спутников ухудшают качество классического определения местоположения. Поэтому для исправления накопленных ошибок IMU и ненадежной обсервации GPS требуется надежный метод VO, позволяющий транспортному средству устойчиво локализовать себя в навигационном пространстве.

Алгоритмы фильтрации обычно используются при объединении нескольких датчиков. Для того, чтобы решить проблему точности геолокации, предлагается адаптивная и надежная стратегия для интегрированной навигационной системы. Для построения вектора измерений может быть использован метод двойной проверки качества GPS для реализации адаптивного переключения фильтра. Испытания показали, что точность горизонтального и трехмерного позиционирования адаптивной робастной стратегии составляет 5,45 м в ситуации GPS/IMU/VO и 5,83 м для варианта GPS/IMU [27]. По сравнению с традиционным алгоритмом GPS и алгоритмом комбинирования без адаптивных и робастных инноваций точность трехмерного позиционирования улучшилась на 69,49 % и 44,64 % соответственно. Результаты валидационных экспериментов показывают, что предполагаемая точность определения местоположения алгоритма комплексной навигации улучшилась на 40–50 % по сравнению с использованием классического фильтра Калмана в одномодальном глобальном позиционировании [28].

Современные требования к надежности и непрерывности альтернативной навигации в условиях помех и недоступности сигналов ГНСС требуют разработки новых методов и средств повышения стабильности и надежности навигационных систем [29]. Одним из способов повышения

помехоустойчивости навигационных решений является создание интегрированной навигационной системы, основанной на использовании КЭНС. Современному судовождению тактически необходима альтернативная надежная и безотказная система местоопределения, работающая повсеместно и в любое время с точностью, соответствующей стратегическому назначению непрерывной всепогодной навигации гражданских потребителей. Обладая в большинстве применений практически сопоставимыми с ГНСС потенциальными возможностями в отношении точности, универсальности, способности интеграции с другими системами при невысокой стоимости аппаратуры ГНСС превосходят пользователей КЭНС по принципиально важному показателю: абсолютной автономности, с учетом ряда дополнительных преимуществ. В отличие от ГНСС, КЭНС ориентируются относительно реальной поверхности Земли, а не условного референц-эллипсоида, обеспечивают автономную навигацию как в воздушной, так и в морской среде, обладают полной помехоустойчивостью и скрытностью функционирования, не нуждаются в существенных финансовых затратах на эксплуатацию, способны обеспечить весьма высокую устойчивость и не оказывают негативного влияния на экологическую обстановку.

Представляется целесообразным для эффективного обеспечения максимальной точности определения местоположения подвижного объекта использовать новые возможности автономной корреляционно-экстремальной навигации в любых обстоятельствах неопределенности спутниковых систем. Ситуацию точности электронной системы определения местоположения можно улучшить кардинально при размещении микшированных данных в виртуальном облаке, так что всякий раз, когда спутниковая информация становится локально недоступной или ненадежной, происходит мгновенное переориентирование аппаратуры на резервные комплексированные сигналы, обеспечивающие продолжение непрерывной точной навигации с помощью синтезированного компьютерного картирования.

Стремление к максимальному интегрированию сигналов улучшает точность навигации как процесса до приблизительной сопоставимости с точностью ГНСС без использования дифференциального режима. При этом потенциал ГНСС в виде уникального сочетания дециметровой точности определения координат, глобальной доступности информации в любой точке на земной поверхности в любое время и при любых метеоусловиях не отвергается, но дополняется перспективными разработками [30]. Достижимая точность технологии высокоточной навигации (в англоязычной литературе Precision Point Positioning (PPP)) находится в пределах нескольких сантиметров [31]. При этом длительность инициализации для вхождения в режим PPP может составить 30–50 мин ввиду влияния *геометрического фактора*. В структуре ГНСС критерий геометрического фактора позволяет количественно оценить влияние взаимного расположения спутниковых ориентиров на финальную точность обсервации.

Основной проблемой при построении следящих навигационных систем является синтез эффективных алгоритмов хранения и воспроизведения геофизических данных в цифровой форме для их практического применения. Оптимальные результаты могут быть достигнуты при восстановлении изоповерхностей с помощью кубических *B*-сплайнов, обеспечивающих как минимум четырехкратное сжатие массивов данных по сравнению с традиционными методами. Вариативно точностные показатели корреляционно-экстремальной навигации можно улучшить на основе практического применения *B*-сплайновых алгоритмов для обработки навигационной информации. Абсолютное доверие к спутниковым методам судовождения повышает риск возникновения аварийной ситуации. В открытом море наличие дополнительной информации о местоположении судна, полученной независимым способом, придает работе судоводителя уверенность в своих действиях.

Результаты (Results)

Апробированный *B*-сплайновый алгоритм является предельно универсальным ввиду того, что позволяет моделировать практически любую навигационную изоповерхность. Сплайн-функции являются универсальным математическим средством изометрического синтеза

геофизического поля по дискретным зондированиям точечного функционала ввиду независимости от конкретного вида фиксируемого параметра. Формат функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными скалярными коэффициентами и узловыми координатами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции по номеру сеточного интервала. Представляется нерациональным рассчитывать массив данных при вычислении каждого значения, более продуктивно в аспекте быстродействия вычислений при каждом расчете вызвать из базы регулярных данных в оперативной памяти компьютера однократно сформированные скалярные сплайновые параметры.

Унифицированным вариантом гарантированного приближения изоповерхностей является применение методов базисных сплайн-функций. *B*-сплайновые тензорные произведения не требуют явного задания производных, и локальное изменение контрольных узлов не приводит к необходимости повторного вычисления всей навигационной изоповерхности. При существующей вариативности применения базисных сплайнов выдвигается гипотеза в пользу оптимальности кубической *B*-сплайновой конструкции с управляемой кривизной для моделирования навигационных изоповерхностей любой степени геометрической сложности.

Метод *B*-сплайнов предоставляет возможность получать приемлемую апробированную точность текущих координат судна при одновременно ограниченных требованиях к объему памяти бортового компьютера. На основе результатов авторского вычислительного эксперимента при использовании кубических *B*-сплайнов получена практическая точность расчета в числовом диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} погрешности навигационного параметра как реализация возможности реалистичной оценки погрешности сплайн-аппроксимации [32]. Математический аппарат двумерной аппроксимации применяется в аспекте исследования оптимизации моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов на основе модифицированного метода наименьших квадратов. Практическая реализация корреляционно-экстремальной навигации осуществляется при соблюдении принципа знания геометрии геофизического поля в виде трехмерной карты сплайнового профиля как эталона информативности при организации автономного движения судна по электронной сплайн-траектории.

При наличии аномальных ошибок в измерительных погрешностях альтернативной навигации для решения проблемы их нивелирования разработаны алгоритмы в рамках стохастического байесовского подхода с использованием модификаций расширенного фильтра Калмана [33]. Обработка измерительной информации на основе базисных сплайнов позволяет корректно определять ошибки алгоритмической модели состояния, а также учитывать неполноту и неопределенность исходной информации. Измерительная погрешность датчиков следящих систем различной физической природы гарантированно обнаруживается в виде геометрической флуктуации на основе апробированного метода визуализации сплайновой изоповерхности за счет нарушения «гладкости» и условий «склейки» доменов синтезированного электронного профиля изоповерхности. Адаптивный алгоритм сплайн-аппроксимации гарантированно может быть использован для восстановления любой поверхности геофизического поля с элементами *сглаживания* в синхронной реализации вопроса необходимой картографической точности. Под сглаживанием экспериментальных данных понимается переход от исходного распределения результатов измерений неплавного характера из-за наличия погрешностей к плавной композиции данных.

В аспекте практической реализуемости концепции корреляционно-экстремальной навигации выполнена последовательность компьютерных визуализаций аппроксимированного вариативного картографического эталона информативности фиксированных фрагментов разновидностей геофизических полей [6], [21], [24]. Альтернативный вариант навигации использует специальный алгоритм сравнения измерений геофизических аномалий в текущем положении с синтезированными данными навигационного поля для постоянной коррекции положения подвижного объекта. Математический аппарат базисных сплайнов позволяет создать для автономного способа навигации надежную картографическую основу на конкретных примерах сплайнового моделирования карты

геофизического поля. Представляется целесообразным подход к синтезированию геофизического графического профиля на основе методов сплайн-функций с целью повышения геометрической схожести аппроксимированной изоповерхности с целью дальнейшего повышения точности позиционирования при использовании корреляционно-экстремальной навигации в морских приложениях.

В рамках апробированного алгоритма двумерной B -сплайновой аппроксимации разработана процедура последовательной оптимизации узлов с ее синхронной реализацией в виде дополнительной подпрограммы прикладного программного обеспечения. Разработанная процедура программируемого размещения узлов на интервале аргумента создает альтернативу фиксированной сетке координат по *схеме Марсдена*. Эффективный подбор узлов осуществляется автоматически с учетом обеспечения наперед заданной погрешности аппроксимации. В качестве меры точности используется евклидова норма погрешности приближения навигационной изоповерхности. Функциональность нормализованного базиса на сегменте аппроксимации соблюдается за счет использования минимально допустимого количества контрольных узлов. Для реализации сглаживающего эффекта при непрерывном изменении кривизны траектории с помощью B -сплайна необходимо не менее пяти контрольных точек.

Базисные финитные конструкции обеспечивают точную подгонку сплайновой кривой к набору запланированных доминирующих узлов, что обусловлено использованием принципа скользящего узла, поскольку правильно выбранные реперные точки играют важную роль в получении лучшей аппроксимации алгебраической кривой любой степени сложности. Для вычисления производных в узлах единичного кубического B -сплайна в первом приближении используется пятиточечная интерполяция. Суть стратегии оптимизации сводится к поиску хаотических скользящих узлов на неравномерной сетке. Входными данными являются массив координат исходного точечного базиса и величина предельной допустимой погрешности. Первым узлом назначается первая точка запланированного базиса на основе неравномерного распределения последующих точек на всем сеточном отрезке.

Первый этап оптимизации сводится к определению первого узла в середине начального сеточного сегмента и синхронному перемещению второго узла по точечному базису на равное погрешности расстояние с параллельным расчетом первых производных в последующих узлах. При этом максимальное расстояние смещения не должно превышать заданной погрешности аппроксимации. При каждом переходе к последующей точке решается задача минимизации расстояния от базиса до сплайна путем вариации сплайновых производных в узлах. Перед выполнением каждого тактического шага проверяется отсутствие нарушения базисной функциональности между предыдущим и последующими узлами. Итерации повторяются до момента выхода погрешности аппроксимации за пределы «коридора» точности. При выполнении данного условия за каждый последующий узел при организации счета от второго узла принимается точка, отстоящая на величину допустимой погрешности от предыдущей. На втором этапе определяется примерное расположение узлов с синхронным вычислением монотонных производных в них по принципу нахождения текущего узла в движении от предыдущего к последующему с проверкой функциональности. Итерационный процесс заканчивается при полной оптимизации распределения всех сеточных точек. Практически процедура оптимизации сходится за две-три итерации. Согласно проведенному вычислительному эксперименту, скорость вычислений увеличивается в 2 раза по сравнению с применением *схемы Марсдена*. При реализации эмпирического подхода время работы подпрограммы замерялось в тысячных долях секунды с заикливанием на 100 000 при решении одинаковых тестовых примеров. Результаты быстрогодействия в цифровой реализации вывелись на дисплей компьютера в оперативной среде Turbo Pascal.

Расчет сплайн-функций и значений производных ориентирован на умножение и сложение, что алгоритмически обуславливает высокую вычислительную скорость расчетов. Положительным аспектом применения принципа скользящего узла являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость процедуры. Полученные преимущества в быстродействии и устойчивости вы-

числений программной реализации оптимизационной процедуры позволяют повысить компактность хранения и скорость обработки навигационной информации при включении разработанного прикладного модуля составной частью в программное обеспечение бортового компьютера.

Положительный результат моделирования в примерах аппроксимации фрагментов различных вариантов геофизического поля [6], [21], [24] 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 для интеллектуальной поддержки принятия решений с целью снижения психологической когнитивной нагрузки. Трехмерное картографирование с реализациями на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа расширяют горизонт ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации как процесса в сложных обстоятельствах плавания с применением элементов виртуальной реальности для возможности повышения надежности контроля местоположения за счет наглядности визуального ориентирования по эталону картографирования. Универсальность составленных паскаль-программ обеспечивает вычислительную реализацию широкого класса задач корреляционно-экстремальной навигации. Модернизированный пакет прикладных программ остается многофункциональным в возможности расчета и визуализации на компьютерном дисплее электронных проекций любой навигационной изоповерхности при использовании авторской компьютерной анимации.

Обсуждение (Discussion)

При маршрутизации у потребителя может произойти ухудшение *геометрического фактора*, при этом пользователь бортовой аппаратуры может предполагать, что подвижной объект под его управлением продолжает осуществлять высокоточную навигацию. Поэтому судоводителю необходимо предоставить возможность конструктивно оценивать *целостность навигационных данных*, чтобы, во-первых, у него была возможность определить завершение процесса инициализации и, во-вторых, он мог с заданной доверительной вероятностью выполнять высокоточное определение местоположения. В отдельных случаях влияние многолучевости может вызвать аномальную ошибку измерений до 100 м, а погрешность измерения псевдодальности, обусловленная ионосферной рефракцией, может достигать значений 30–40 м для космических аппаратов на низких орбитах [31].

Принципиально важным является рассмотрение применения новой коммуникационной стратегии для обмена комбинированной информацией, согласно которой вместо передачи с фиксированной скоростью данные передаются только тогда, когда ошибка определения местоположения судна не превышает заданный предельный порог допустимой погрешности с прогнозируемой вероятностью как нарушение критерия целостности. Постулат *целостности* рассматривается как современный итерационный критерий доверительной оценки правдоподобной валидности обработки навигационной информации. Под целостностью автономной системы позиционирования понимается независимая способность навигационной аппаратуры обнаруживать ненормальную ситуацию при измерении, которая может привести к координатной погрешности, превышающей заданную границу допустимой возможности.

От применимости критерия целостности зависит способность технической системы информировать потребителей услуг об ухудшении точности обсерваций за счет оперативного обнаружения и исключения измерений навигационных параметров с аномальными ошибками. Автономный контроль целостности характеризует способность ЭСОМ обнаруживать неточности функционирования и своевременно исключать возможность использования недостоверных данных пользователями бортовой аппаратуры при недопустимых отклонениях рабочих характеристик. При реализации процедуры «мониторинга целостности» интервал между моментом обнаружения аномалии и доведения информации до пользователя составляет не более 6 с [31].

При навигационном использовании ГНСС аппаратура целостности каждые 10 с сравнивает дифференциальные поправки от опорной станции со своим собственным эталонным набором

поправок, подавая сигнал тревоги, если разница между поправками превышает наперед заданное пороговое значение. Если диапазон между расчетными и наблюдаемыми результатами определения места судна превышает предел защиты, традиционно устанавливаемый в морских приложениях на уровне 25 м, то подается блокирующий сигнал, и обсервация не может быть использована, так как данные позиционирования не прошли проверку на *целостность определения навигационного местоположения*, т. е. математически реализуется предупреждение судоводителя в пределах заданного периода времени в случае, если ошибка геолокации превышает допустимый предел. По сути, феномен целостности фиксирует меру доверия к навигационной информации для практического использования потребителем. Базовой информацией для проверки целостности работоспособности ГНСС являются данные о техническом состоянии спутников и их неисправностях, возможных искажениях сигналов в каналах передачи данных, об отказах и недопустимых погрешностях навигационных параметров в бортовой аппаратуре, а также о рисках использования недостоверной информации.

При реализации статистического компьютерного моделирования для анализа автономной системы «мониторинга целостности» навигационных данных спутниковых радионавигационных систем установлено, что если навигационный спутник недееспособен, то признак неисправности появится в информации навигационных сообщений в альманахе системы на всех навигационных спутниках не позднее чем через 16 ч [34]. При этом сообщение о недееспособности передается потребителю в составе оперативной информации не позднее чем через 1 мин [31]. Ориентированные на применение критерия целостности алгоритмы позволяют оперативно обнаруживать недопустимое ухудшение в работе навигационной системы и своевременно принимать ответственное решение о выборе альтернативной системы позиционирования.

Данный критерий в навигационных целях может быть применен в сложных технических системах судовождения для определения необходимости организации оптимального итерационного цикла. ЭСОМ с высокой степенью целостности должна своевременно останавливать итерационный процесс с целью обеспечения надежности показателей работы в любое время и при любых условиях. Поэтому целостность необходимо понимать как эффективный критерий для принятия решения о возможности реализации повторной итерационной процедуры расчета координат местоположения судна. Стандартно итерационный процесс завершается после выполнения проверки окончания вычислительной процедуры по условию соответствия финальной точности расчетов в виде разницы между двумя последовательными итерациями с наперед заданной по практическим соображениям допустимой погрешностью как успешной реализацией условия целостности. По мере того как компьютеризированные системы революционизируют мостики современных судов, а ЭКНИС становится альтернативой традиционным бумажным картам, «мониторинг целостности» в режиме реального времени как форма сравнения избыточных навигационных данных приобретает значение важной процедуры для обеспечения безопасности судовождения.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Выявлены преимущества и недостатки использования различных автономных вариантов корреляционно-экстремальной навигации в результате выполненного обзорного анализа существующей проблематики альтернативного позиционирования. Предполагается навигационное использование КЭНС в качестве альтернативы глобальным спутниковым системам.
2. Гибридный *B*-сплайновой алгоритм адаптирован под моделирование картографического эталона информативности навигационного поля с высокими показателями точности аппроксимации при модернизации хаотичной расстановки сеточных узлов.
3. Применение критерия целостности гарантирует практическое улучшение итерационного процесса расчета обсервованных координат для высокоточного альтернативного позиционирования в режиме реального времени.

4. Примененная процедура оптимизации распределения сеточных точек по принципу поиска эффективной позиции скользящего узла позволяет увеличить быстродействие расчетов в 2 раза, что, безусловно, является важным в навигационных приложениях для своевременного принятия решения.

5. Программное обеспечение для бортового компьютера модифицировано для синтеза аномальных фрагментов геофизического поля в качестве универсальной практической реализации КЭНС. Алгоритм оптимизации расстановки узлов реализован в виде отдельной подпрограммы, синхронизированной с общим пакетом прикладных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berdyshev V. I.* Navigation of moving objects by geophysical fields / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2007. — Vol. 140. — Is. 6. — Pp. 767–795. DOI: 10.1007/s10958-007-0017-5.
2. *Stepanov O. A.* Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory / O. A. Stepanov, V. A. Vasilev, Yu. A. Litvinenko, A. M. Isaev // 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2023. — Pp. 125–130. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.
3. *Ююкин И. В.* Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517. — EDN RHDIUL.
4. *Конешов В. Н.* Условия определения координат движущегося объекта на геофизическом ориентире / В. Н. Конешов, П. С. Михайлов, В. В. Дорожков // *Геофизические исследования*. — 2023. — Т. 24. — № 4. — С. 43–57. DOI: 10.21455/gr2023.4-3. — EDN MZALKH.
5. *Yuyukin I. V.* Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // *AIP Conference Proceedings: International Scientific Conference*. — International Transport Scientific Innovation (ITSI 2021). — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.
6. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39. — EDN FNMZIL.
7. *Berdyshev V. I.* Extremal problems of navigation by geophysical fields / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. — 2018. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 4–18. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-2-4-18.
8. *Liu W.* Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review) / W. Liu // *Mathematics and Mathematical Modeling*. — 2018. — Vol. 1. — Pp. 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.
9. *Ююкин И. В.* Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.
10. *Psiaki M.* Attackers can spoof navigation signals without our knowledge. Here's how to fight back GPS lies / M. Psiaki, T. Humphreys, B. Stauffer // *IEEE Spectrum*. — 2016. — Vol. 53. — Is. 8. — Pp. 26–53. DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7524168.
11. *Falco G.* The Vacuum of Space Cybersecurity / G. Falco // 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. — Pp. 5275–5279. DOI: 10.2514/6.2018-5275.
12. *Falco G.* Cybersecurity Principles for Space Systems / G. Falco // *Journal of Aerospace Information Systems*. — 2019. — Vol. 16. — Is. 2. — Pp. 61–70. DOI: 10.2514/1.I010693.
13. *Liu Y.* Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System / Y. Liu, S. Li, Q. Fu, Z. Liu // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18. — Is. 5. — Pp. 1433. DOI: 10.3390/s18051433.
14. *Berdyshev V. I.* Methods for Tracking an Object Moving in R^3 under Conditions of Its Counteraction / V. I. Berdyshev // *Doklady Mathematics*. — 2024. — Vol. 109. — Is. 3. — Pp. 291–294. DOI: 10.1134/S1064562424702168.

15. *Berdyshev V. I.* A Trajectory Minimizing the Exposure of a Moving Object / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. — 2021. — Vol. 313. — Is. S1. — Pp. S21–S32. DOI: 10.1134/S0081543821030044.
16. *Lavrenov R.* Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance / R. Lavrenov, F. Matsuno, E. Magid // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer, Cham, 2017. — Vol. 10459. — Pp. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.
17. *Magid E.* Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning / E. Magid, R. Lavrenov, M. Svinin, A. Khasianov // Informatics in Control, Automation and Robotics. Lecture Notes in Electrical Engineering. — Springer, Cham, 2020. — Vol. 495. — Pp. 475–496. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_24.
18. *Джанджгава Г. И.* Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям / Г. И. Джанджгава, Г. И. Герасимов, Л. И. Августов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 3(140). — С. 74–84. — EDN PYMMVZ.
19. *Фатеев В. Ф.* Макет системы по геофизическим полям земли / В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, Ю. В. Гостев [и др.] // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 4(24). — С. 173–184. — EDN KZPLNH.
20. *Stepanov O. A.* The Effect of Measurement Preprocessing in the Gravity-Aided Navigation / O. A. Stepanov, A. S. Nosov // 5th Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019). — International Association of Geodesy Symposia. — Springer International Publishing, 2021. — Vol. 153. — Pp. 141–145. DOI: 10.1007/1345_2021_131.
21. *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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534. — EDN KGJJVG.
22. *Торопов А. Б.* Алгоритмы фильтрации в задачах коррекции показаний морской навигационной системы с использованием нелинейных измерений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Торопов. — СПб., 2013. — 20 с.
23. *Xi M.* Matching area selection for arctic gravity matching navigation based on adaptive all-field extended extremum algorithm / M. Xi, L. Wu, Q. Li, G. Mao, P. Wu, B. Ji, L. Bao, Y. Wang // IET Radar, Sonar & Navigation. — 2024. — Vol. 18. — Is. 8. — Pp. 1307–1317. DOI: 10.1049/rsn2.12571.
24. *Ююкин И. В.* Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014. — EDN JRCDLU.
25. *Safin R.* Modern Methods of Map Construction Using Optical Sensors Fusion / R. Safin, T. Tsoy, R. Lavrenov, I. Afanasyev, E. Magid // International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2023). — ALife Robotics Corporation Ltd., 2023. — Vol. 28. — Pp. 166–169. DOI: 10.5954/ICAROB.2023.OS6-6.
26. *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. — 2022. — Vol. 23. — Is. 8. — Pp. 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
27. *Dai Y.* An Adaptive and Robust Strategy for GPS/IMU/VO Integrated Navigation / Y. Dai, R. Sun // China Satellite Navigation Conference (CSNC 2024) Proceedings. — Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Nature Singapore, 2024. — Vol. 1094. — Pp. 555–565. DOI: 10.1007/978-981-99-6944-9_48.
28. *Yan X.* Cooperative navigation in unmanned surface vehicles with observability and trilateral positioning method / X. Yan, X. Yang, M. Lou, H. Ye, Z. Xiang // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 306. — Pp. 118078. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118078.
29. *Fateev V.* Problems of creating autonomous navigation systems on geophysical fields / V. Fateev, D. Bobrov, M. Muzabekov, R. Davlatov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 310. — Pp. 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/202131003008.
30. *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.
31. *Куришин В. В.* Методика определения целостности высокоточных навигационных определений / В. В. Куришин, А. В. Молоканов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2017. — Т. 4. — № 2. — С. 3–10. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.2.3. — EDN ZIBDCF.

32. Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934. — EDN QQIVCX.

33. Stepanov O. Recursive Estimation Algorithms for AUV Collaborative Navigation in Case of Abnormal Outliers in Measurements / O. Stepanov, Y. Litvinenko, A. Isaev // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer Nature Switzerland, 2024. — Pp. 88–100. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_7.

34. Ivanov A. V. Autonomous navigation data integrity monitoring of satellite radio navigation systems based on residual method / A. V. Ivanov, D. V. Boykov, O. V. Trapeznikova, A. P. Pudovkin, E. V. Trapeznikov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 1546. — № 1. — Pp. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012016.

REFERENCES

1. Berdyshev, V. I. and V. B. Kostousov. “Navigation of moving objects by geophysical fields.” *Journal of Mathematical Sciences* 140.6 (2007): 767–795. DOI: 10.1007/s10958-007-0017-5.

2. Stepanov O. A., V. A. Vasilev, Yu. A. Litvinenko, and A. M. Isaev. “Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory.” *2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. — IEEE, 2023. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.

3. Yuyukin, I. 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): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.

4. Koneshov, V. N., P. S. Mikhailov, and V. V. Dorozhkov. “Conditions for determining the coordinates of a moving object on a geophysical landmark.” *Geophysical research* 24.4 (2023): 43–57. DOI: 10.21455/gr2023.4-3.

5. Yuyukin, I. V. “Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation.” *AIP Conference Proceedings* 2476.1 (2023): 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.

6. 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.

7. Berdyshev, Vitalii Ivanovich, and Viktor Borisovich Kostousov. “Extremal problems of navigation by geophysical fields.” *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 6.2 (2018): 4–18. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-2-4-18.

8. Liu, Wei. “Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review).” *Mathematics and Mathematical Modeling* 1 (2018): 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.

9. Yuyukin, Igor V. “Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of no-go areas in due time.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.

10. Psiaki, Mark L., Todd E. Humphreys, and Brian Stauffer. “Attackers can spoof navigation signals without our knowledge. Here’s how to fight back GPS lies.” *IEEE Spectrum* 53.8 (2016): 26–53. DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7524168.

11. Falco, Gregory. “The Vacuum of Space Cybersecurity.” *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. 5275–5279. DOI: 10.2514/6.2018-5275.

12. Falco, Gregory. “Cybersecurity Principles for Space Systems.” *Journal of Aerospace Information Systems* 16.2 (2019): 61–70. DOI: 10.2514/1.1010693.

13. Liu, Yang, Sihai Li, Qiangwen Fu, and Zhenbo Liu. “Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System.” *Sensors* 18.5 (2018): 1433. DOI: 10.3390/s18051433.

14. Berdyshev, Vitaliy I. “Methods for Tracking an Object Moving in R^3 under Conditions of Its Counteraction.” *Doklady Mathematics* 109.3 (2024): 291–294. DOI: 10.1134/S1064562424702168.

15. Berdyshev, Vitaliy I., and Victor B. Kostousov. “A Trajectory Minimizing the Exposure of a Moving Object.” *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 313.S1 (2021): S21–S32. DOI: 10.1134/S0081543821030044.

16. Lavrenov, R. and F. M., E. Matsuno. “Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance.” *Interactive Collaborative Robotics* Springer International Publishing, 2017: 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.

17. Magid, E. and R. S., M. K., A. Lavrenov. “Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning.” *Informatics in Control, Automation and Robotics* Springer International Publishing, 2020: 475–496. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_24.
18. Dzhandzhgava, G. I., G. I. Gerasimov and L. I. Avgustov. “Navigation and homing by spatial geophysical fields.” *Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences* 3(140) (2013): 74–84.
19. Fateev, V.F., D. S. Bobrov, Yu. V. Gostev, E. A. Rybakov, M. N. Karapetyan, R. A. Davlatov, A. O. Dolgodush, and Yu. V. Moskvitin. “Layout of the system on geophysical potential of the earth.” *Al'manac of Modern Metrology* 4 (2020): 173–184.
20. Stepanov, Oleg Andreevich, and Aleksei Sergeevich Nosov. “The Effect of Measurement Preprocessing in the Gravity-Aided Navigation.” *5th Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019)*. — *International Association of Geodesy Symposia*. — Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/1345_2021_131.
21. 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.
22. Toropov, Anton B. *Algoritmy filtratsii v zadashah korrektsii pokazaniy morskoy navigatsionnoy sistemy s ispol'zovaniem nelineynykh izmereniy*. Abstract of PhD diss. SPb., 2013.
23. Xi, Menghan, Lin Wu, Qianqian Li, Guocheng Mao, Pengfei Wu, Bing Ji, Lifeng Bao, and Yong Wang. “Matching area selection for arctic gravity matching navigation based on adaptive all-field extended extremum algorithm.” *IET Radar, Sonar & Navigation* 18.8 (2024): 1307–1317. DOI: 10.1049/rsn2.12571.
24. 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.
25. Safin, Ramil, Tatyana Tsoy, Roman Lavrenov, Ilya Afanasyev, and Evgeni Magid. “Modern Methods of Map Construction Using Optical Sensors Fusion.” *International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2023)*. — ALife Robotics Corporation Ltd., 2023. DOI: 10.5954/ICAROB.2023.OS6–6.
26. 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 (2022): 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
27. Dai, Yeying, and Rui Sun. “An Adaptive and Robust Strategy for GPS/IMU/VO Integrated Navigation.” *China Satellite Navigation Conference (CSNC 2024) Proceedings*. — *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Nature Singapore, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-6944-9_48.
28. Yan, Xin, Xiaofei Yang, Mengmeng Lou, Hui Ye, Zhengrong Xiang. “Cooperative navigation in unmanned surface vehicles with observability and trilateral positioning method.” *Ocean Engineering* 306 (2024): 118078. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118078.
29. Fateev, Vyacheslav, Dmitrii Bobrov, Murat Murzabekov, and Ruslan Davlatov. “Problems of creating autonomous navigation systems on geophysical fields.” *E3S Web of Conferences*. Vol. 310. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202131003008.
30. Peshekhonov, V.G. “High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data.” *Gyroskopy and Navigation* 13.1 (2022): 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.
31. Kurshin, Vladimir V., and Andrej V. Molokanov. “Method for assessment of integrity of high-precision navigational sightings.” *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems* 4.2 (2017): 3–10. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.2.3.
32. Yuyukin, Igor V. “Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.
33. Stepanov, Oleg, Yulia Litvinenko, and Alexey Isaev. “Recursive Estimation Algorithms for AUV Collaborative Navigation in Case of Abnormal Outliers in Measurements.” *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. — Springer Nature Switzerland, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_7.
34. Ivanov, A.V., D. V. Boykov, O. V. Trapeznikova, A. P. Pudovkin, and E. V. Trapeznikov. “Autonomous navigation data integrity monitoring of satellite radio navigation systems based on residual method.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1546. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012016.

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 25 февраля 2025 г.

Received: Feb 25, 2025.