

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54

MAP-AIDING OF THE ADDITIONAL SECONDARY FACTORS ISOSURFACE BY THE SPLINE APPROXIMATION METHOD AS A CONDITION OF IMPROVING THE E-LORAN OBSERVATIONS ACCURACY

I. V. Yuyukin

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

The benefit of the Loran ground-based radio navigation system as an alternative to global navigation satellite systems is argued. The motivation of searching for a duplicate variant is caused by the necessity to ensure the reliability of positioning as a subject of countering spoofing and jamming risks when implementing the concept of cybernetic awareness on water transport. Hypothetically, the possibility of using e-Loran on the Northern Sea Route as a backup navigation system is considered. The experience of operating pilot projects of the enhanced Loran in the issue of the predicted potential of positioning accuracy is analyzed. The optimal method of compensation for the system error of geolocation based on the use of additional secondary factors is investigated. Taking into account the principle of the d-Loran functional, based on comparing the measured values of the radio signal passage delay with published analogues for transmitting clarifications to marine consumers, the necessity of using integrity as a criterion for a confidence assessment of the navigation information processing reliability has been determined. A critical analysis of the attempts effectiveness to use the linear interpolation method to calculate intermediate representative values of the delay in the radio signal transmission in order to simulate the map of additional secondary factors is performed. The hypothesis of the prospects for the isosurface corrections synthesis based on B-spline approximation is put forward. The South Korean experiment of synthesizing a chart of additional secondary factors with measured indicators of the radio signal propagation time delay in nanoseconds from the Pohang transmitting station has been repeated at the correct algorithmic level. In order to demonstrate the practical feasibility of the spline algorithm, a computer visualization of a cartographic fragment of additional secondary factors of Yongil Bay is performed. It is suggested that three-dimensional representation of the additional secondary factor for situational perception by the Officer on watch of map-aided correction as a process in alternative positioning in order to increase the reliability of location control through visual evaluation of proper use of corrections of the e-Loran differential variant. The prospect of using the developed package of applied Pascal-programs with implementations on display-type monitors as intellectual support for decision-making by the navigator in a posteriori assessment of the observation accuracy due to the visual representation of the correction field is noted.

Keywords: spoofing, jamming, cybernetic awareness, additional secondary factors, the criterion of integrity, map-aided correction.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Map-aiding of the additional secondary factors isosurface by the spline approximation method as a condition of improving the e-Loran observations accuracy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.

УДК 656.61.052

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ИЗОПОВЕРХНОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВТОРИЧНЫХ ФАКТОРОВ МЕТОДОМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ КАК УСЛОВИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБСЕРВАЦИЙ E-LORAN

И. В. Ююкин

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

Аргументировано предложение в пользу наземной радионавигационной системы e-Loran в качестве альтернативы глобальным навигационным спутниковым системам. Мотивация поиска дублирующего варианта вызвана необходимостью обеспечения надежности позиционирования как предмета противодействия

спуфинговым и джамминговым рискам при реализации концепции кибернетической осведомленности на водном транспорте. Гипотетически рассмотрена возможность использования e-Loran на трассе Северного морского пути в качестве резервной навигационной системы. Проанализирован опыт эксплуатации пилотных проектов усовершенствованного Loran в вопросе прогнозируемого потенциала точности позиционирования. Исследован оптимальный способ компенсации системной погрешности геолокации на основе использования дополнительных вторичных факторов. С учетом принципа функционала d-Loran, основанного на сравнении измеренных значений задержки прохождения радиосигнала с опубликованными аналогами для передачи уточнений морским потребителям, определена необходимость применения целостности как критерия достоверной оценки надежности обработки навигационной информации. Выполнен критический анализ результативности попыток применения метода линейной интерполяции для вычисления промежуточных репрезентативных значений задержки прохождения радиосигнала с целью имитационного моделирования карты дополнительных вторичных факторов. Выдвинута гипотеза перспективности синтеза изоповерхности поправок на основе B-сплайновой аппроксимации. Реализован повтор на корректном алгоритмическом уровне южнокорейского эксперимента синтеза карты дополнительных вторичных факторов с измеренными показателями хронометражной задержки распространения радиосигнала в наносекундах от передающей станции Пхохан. С целью демонстрации практической реализуемости сплайнового алгоритма выполнена компьютерная визуализация картографического фрагмента дополнительных вторичных факторов залива Йонгиль. Выдвинуто предположение о целесообразности трехмерного представления дополнительного вторичного фактора для ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации с коррекцией по карте как процесса в альтернативном позиционировании с целью повышения надежности контроля местоположения за счет визуального оценивания правильности использования поправок дифференциального варианта e-Loran. Отмечается перспектива применения разработанного пакета прикладных паскаль-программ с реализациями на мониторах дисплейного типа в качестве интеллектуальной поддержки принятия решений судоводителем при апостериорной оценке точности обсервации за счет наглядности визуального представления поля поправок.

Ключевые слова: спуфинг, джамминг, кибернетическая осведомленность, дополнительные вторичные факторы, критерий целостности, коррекция по карте.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Картографирование изоповерхности дополнительных вторичных факторов методом сплайн-аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Loran / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.

Введение (Introduction)

Несмотря на высокую точность глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) в конце первой четверти XXI в. не считаются достаточно надежным средством для использования без резервного копирования в качестве единственного варианта позиционирования и хронометража для критически важных навигационных применений [1]. Проект e-Loran представляется наилучшим техническим решением, позволяющим обеспечить оптимальное дублирование ГНСС. Усовершенствованный Loran является новейшей разработкой в серии низкочастотных навигационных систем дальнего действия. В ответ на уязвимости GPS проект e-Loran эволюционировал от предшественника как модернизированная трансформация ресурсов Loran-C. Прогрессивное развитие улучшает Loran-C за счет усовершенствования оборудования, надежности передаваемого сигнала и рабочих процедур. Инновации позволяют e-Loran обеспечивать более высокую производительность и точность определения места судна по сравнению с Loran-C, а также характеризуют новую систему как резервный вариант спутниковой навигации в морских приложениях.

Система e-Loran соответствует набору мировых стандартов и функционирует полностью независимо от GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou или других ГНСС. Приемник e-Loran каждого морского пользователя будет устойчиво функционировать во всех регионах, где предоставляется такая услуга. Приемники e-Loran работают автоматически при минимальном участии пользователя, передачи синхронизируются с идентифицируемым, публично сертифицированным источником Всемирного координированного времени (Universal Time Coordinated — UTC), полностью независимым от ГНСС методом. Это позволяет поставщику услуг e-Loran работать в масштабе времени, синхронизиро-

ванном с временными шкалами ГНСС, но работающим независимо от них. Синхронизация с общим источником времени также позволяет приемникам использовать гибридную комбинацию сигналов спутников и e-Loran в качестве потенциального инструмента передачи национального времени. Принципиальным отличием e-Loran от традиционного Loran-C является добавление канала передачи данных к передаваемому сигналу, что позволяет передавать на приемник пользователя исправления, предупреждения и информацию о целостности сигнала, относящиеся к конкретному приложению. Именно этот канал передачи данных позволяет e-Loran быть конкурентоспособным GPS.

Международные дискуссии относительно концепции электронной навигации сформировали надежную систему определения местоположения в качестве одного из важнейших компонентов. Известно, что ГНСС обладают уязвимостями, а бортовые альтернативы, такие как инерциальные системы, имеют ограничения. В ситуации поиска реальной замены ГНСС представляется логичным выдвинуть аргумент в пользу усовершенствованной версии наземной радионавигационной системы Loran.

В ходе практической реализации исследования были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать точностные характеристики РНС e-Loran в условиях современности и в перспективе на основе учета опыта функционирования пилотных проектов.
2. Рассмотреть гипотетическую возможность использования e-Loran на трассе СМП в качестве альтернативной (резервной) системы позиционирования.
3. Обосновать целесообразность моделирования карты *дополнительных вторичных факторов* на основе методов *B*-сплайновой аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Loran.
4. Реализовать южнокорейский эксперимент картирования поправок задержки распространения радиосигнала с позиций кусочных аппроксимаций в качестве доказательства работоспособности сплайнового алгоритма в вопросе повышения точности обсерваций e-Loran.
5. Рассмотреть применение феномена *целостности данных* как критерия доверия к навигационной информации в аспекте функционирования дифференциального варианта e-Loran.
6. Разработать пакет прикладных паскаль-программ обеспечения картографирования поправок на распространение радиоволн *методом сплайн-функций* в качестве обеспечения поддержки принятия решений вахтенным помощником в оценке точности обсерваций e-Loran.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первоначальная гарантированная 20-метровая точность системы e-Loran в определенной мере отвечает требованиям, предъявляемым к навигационным приборам для захода судна в морской порт при использовании услуг, основанных на определении местоположения [1], [2]. Опыт эксплуатации системы Loran-C выявил серьезный недостаток в виде устаревшей конфигурации геометрии так называемых *цепочек станций* для обеспечения регионального навигационного покрытия системной точности. Технология e-Loran, в отличие от классической концепции цепочки, работает по принципу ранжирования сигналов с учетом фиксированных условий наилучшего распространения. В то время как старая концепция Loran-C гарантировала точность позиционирования менее четверти мили, дифференциальный e-Loran в настоящее время обеспечивает погрешность менее 10 м за счет более высокой стабильности сигнала, чем у его предшественника.

Точность временной синхронизации в 100 наносекунд (нс) на приемной антенне e-Loran определяет уникальные возможности новой системы. Практическая точность позиционирования системы e-LORAN в настоящее время реализуется в диапазоне 8–20 м [3]. Дифференциальный режим e-Loran, по прогнозам, предоставит в ближайшие годы морским потребителям потенциальную точность ниже 5 м [4]. Успешное развитие интегрированных инерциально-спутниковых систем в конечном итоге приведет к глобальному повышению навигационной точности до 1 м для гражданских потребителей, но в современных условиях только армейские приемники обеспечивают погрешность определения места 3 м при использовании закрытых военных каналов связи GPS [5].

Проект e-Logan в настоящее время демонстрирует точностные характеристики на уровне соответствующих показателей GPS без учета дифференциального режима.

Низкочастотный e-Logan в условиях современности становится предпочтительным передовым источником сигналов определения местоположения, навигации и синхронизации времени. Проект e-Logan официально стандартизирован во всем мире с целевой функцией минимизирования уязвимости спутниковых сигналов к случайным или преднамеренным помехам, намеренной подмене данных, радиочастотным помехам или явлениям космической погоды. Новая система позиционирования Logan также способна обеспечивать чрезвычайно точные привязки по времени и частоте, необходимые телекоммуникационным системам, обеспечивающим голосовую и интернет-связь.

Система e-Logan характеризуется как основанная на цифровых технологиях современная версия физически устаревшей системы Logan-C. Инновация повторно использует передающие станции своего предшественника для определения местоположения с гораздо более высокой точностью, непрерывностью, доступностью и целостностью [6]. Перспективные передатчики излучают точно рассчитанные импульсы мощностью в сотни киловатт на частоте 100 кГц. Для обеспечения высокоточной навигации импульсы должны быть рассчитаны с точностью до наносекунд. Благодаря этому они могут выполнять дополнительную функцию точного распределения времени на большие расстояния. Временная синхронизация каждой передающей станции определяется локальным набором из трех атомных часов цезиевого стандарта, которые сами синхронизируются с интервалами по UTC по сравнению с основным стандартом. Таким образом, передачи привязываются к UTC, обеспечивая источник времени, отслеживаемого по UTC, полностью независимому от ГНСС.

Инновационная система использует импульсные сигналы с частотой 100 кГц при обеспечении невосприимчивости к помехам радиосигналов большой дальности действия. Новый Logan обеспечивает надежное системное покрытие минимально на расстояние 18 км и максимально на расстояние более 1000 миль [2]. Вследствие указанных преимуществ у мировой морской общественности возникает понимание перспективности e-Logan для использования в качестве резервной системы для ГНСС во всех отношениях. Появляется реальная возможность применения инновационной резервной системы в проблемных ситуациях для ГНСС. Наиболее жизнеспособной наземной системой, предоставляющей услуги позиционирования и хронометража, соответствующей требованиям Международной морской организации (International Maritime Organization — IMO), является e-Logan. Благодаря трем передатчикам e-Logan может быть обеспечена точность горизонтального позиционирования менее 10 м с синхронизацией времени по UTC в течение 50 нс, что достаточно для того, чтобы выступать в качестве альтернативы ГНСС [4]. Организация признает необходимость наличия на борту нескольких систем определения местоположения и разработала концепцию электронной навигации для повышения безопасности на море с помощью технических средств, которая требует для надежности наличия по крайней мере двух независимых разнородных источников определения местоположения и времени в навигационной системе.

Великобритания и Ирландия установили к концу октября 2014 г. дифференциальные опорные станции e-Logan для обеспечения начальной готовности к эксплуатации принципиально новой системы. Совместно с передатчиками Logan в Англии, Франции, Германии и Дании дифференциальные опорные станции e-Logan обеспечивают точность определения местоположения, равную 10 м, в семи портах и подходах к ним вдоль Восточного побережья Англии и Шотландии. Пилотная карта конфигурации инновационного проекта приведена на рис. 1 [4].

Исследования инерциальных навигационных систем показали, что они не представляют собой полноценной резервной копии GPS, а испытания усовершенствованного Logan, проведенные в Великобритании, доказывают, что e-Logan действительно обладает потенциалом для обеспечения производительности, эквивалентной ГНСС, и является ее полностью дополняющей системой [7]. Европейская система e-Logan была введена в эксплуатацию осенью 2014 г. Финансовый прогноз по эффективности эксплуатации e-Logan в водах Великобритании и Ирландии предполагает эко-

нонию более 4 млн фунтов стерлингов в год в течение номинального срока службы системы, составляющего 10 лет с момента полномасштабного внедрения услуг электронной навигации в 2018–2028 гг. [8].



Рис. 1. Европейский дифференциальный вариант эксплуатационных возможностей e-Loran

Для интенсивного развития проекта может быть повторно использована бывшая европейская инфраструктура Logan-C с передатчиками, расположенными в Великобритании (Анторн, Мидлсбро), Франции (Лессей и Сустон), Германии (Зюльт), Дании (Эйде, Фарерские острова) и Норвегии (Верландет, Бо, Ян-Майен и Берлеваг). Британская станция в Анторне является усовершенствованным прототипом e-Loran с возможностью передачи данных по традиционному каналу Logan, обеспечивающему UTC и дифференциальные поправки для судовождения у восточного побережья Великобритании. В настоящее время в Мидлсбро нет передачи измеренных данных, поскольку коммуникационная инфраструктура все еще нуждается в установке. Производительность на четырех объектах в Харвиче, Дувре, Ширнесе и Лейте превышает прогноз на 15–32 % [8]. Первая установка бортового оборудования e-Loran была завершена осенью 2014 г. на пароме *Pride of Hull*, курсирующем между Халлом и Роттердамом в рамках исследования возможностей дифференциального проекта e-Loran. На судне проводились специальные эксперименты сравнения точности позиционирования GPS и e-Loran. Точечная диаграмма и распределение кумулятивных ошибок показали, что разница между e-Loran и GPS полностью нивелируется в течение 7,84 мин для 95 % всех измерений [4].

В настоящее время результаты тестирования позволяют сделать вывод о том, что измеренная производительность европейской службы e-Loran находится на максимальном уровне прогнозируемой производительности. Модель дифференциального проекта e-Loran, представленная на рис. 1, полезна тем, что позволяет оценивать точность в заданном местоположении. Архитектура европейской конфигурации e-Loran обладает достаточной гибкостью, чтобы иметь возможность изменять такие параметры, как интервалы усреднения и частоту обновления.

Проведенные натурные эксперименты показали, что система e-Loran может предоставлять услуги точного позиционирования с производительностью, сравнимой с GPS. Это особенно важно для морских применений, где концепция ИМО по электронной навигации требует наличия двух независимых источников информации: о местоположении и времени. Соединенное Королевство фактически ввело в эксплуатацию службу e-Loran в Европе с первоначальным дифференцированным оперативным потенциалом.

За последнее десятилетие произошло резкое увеличение числа отключений спутниковых сигналов из-за преднамеренного создания помех ГНСС [9]. Поскольку ГНСС широко используются, необходимо приложить дополнительные усилия, чтобы создать возможность устойчивости ко все более часто наблюдающимся случаям глушения и подмены спутниковых сигналов. Необходимость поиска дублирующей системы GPS мотивирована тем, что надежность позиционирования является

предметом для разрешения спуфинговых и джамминговых ситуаций в реализации кибернетической осведомленности в морской отрасли [10]. Подтверждением актуальности проблемы может служить южнокорейский крупномасштабный инцидент 2016 г., когда было зафиксировано продолжавшееся в течение недели радиоэлектронное преднамеренное подавление сигналов GPS Северной Кореей, под негативное воздействие которого попало 715 судов, 1007 летательных аппаратов и 1794 вышки сотовой связи [11]. Крупномасштабный инцидент с глушением сигналов GPS, произошедший в Южной Корее, подтверждает практическую важность дублирования спутниковой системы альтернативным методом, основанным на других принципах функционирования.

Пример политического противостояния Южной Кореи и КНДР в вопросе безопасности судовождения выражается в парадоксальной необходимости для южнокорейских моряков периодически возвращать суда к причалам вследствие региональной блокировки сигналов GPS. Правительство Южной Кореи было вынуждено переориентироваться на принципиально новую систему позиционирования e-Lozan. Работоспособность пилотного проекта e-Lozan в Южной Корее в ситуации постоянных проблем с GPS подтверждает дееспособность перепрофилирования на альтернативную наземную систему радионавигации в Азиатско-Тихоокеанском регионе с группой из пяти станций, демонстрируемых на рис. 2 [12].



Рис. 2. Южнокорейский пилотный проект e-Lozan

После четырех лет исследований и разработок южнокорейская испытательная стендовая система e-Lozan была введена в эксплуатацию с 1 июня 2021 г. [13]. Изначально требуемая точность системы e-LORAN на Корейском полуострове планировалась равной 20 м [14]. В результате проведения специального эксперимента на расстоянии до 160 км от передатчика испытательного стенда в Инчхоне был установлен эксплуатационный показатель точности местоположения системы e-Lozan в 15 м с вероятностью 95 % на этапе захода любого судна в порт на основе *метода компенсации системной погрешности* при помощи использования так называемых *дополнительных вторичных факторов* [15].

Правительство Южной Кореи в перспективе намерено совершенствовать инфраструктуру дальней навигации e-Lozan для обеспечения резервных навигационных возможностей для морских пользователей. При оптимальном развертывании дополнительных передатчиков e-Lozan в настоящее время параллельно ведутся интенсивные методические поиски путей создания высокоточной общенациональной системы. С использованием фактических измерений погрешности электронного местоопределения по всей стране специальными научными исследованиями было подтверждено, что достигнутая точность может быть улучшена за счет применения инновационных

алгоритмов примерно на 10–91 % с устойчивым экспериментальным показателем, равным 8,49 м, по сравнению с апробированными симуляторами точности позиционирования южнокорейской e-Loran [14]. Анализ точности позиционирования службы e-Loran дает уверенность в практической осуществимости ее внедрения как общенациональной системы в качестве альтернативы GPS в ситуации проблемной затруднительности функционирования ГНСС в Северо-Восточной Азии. В Китае также были проведены соответствующие исследования в рамках крупного национального инфраструктурного проекта по разработке наземного инновационного Лорана [16].

В перспективе на основе существующего опыта проведения испытаний европейского и южнокорейского пилотных проектов, в США планируется установить 71 дифференциальную станцию e-Loran, которые будут охватывать 50 крупных американских мегаполисов, 50 крупных аэропортов и 50 крупных портов с возможностью передачи корректирующей информации по каждому каналу от 40 дифференциальных станций [8]. Стремление различных стран создать надежный резервный сервис позиционирования объясняется высокими требованиями кибернетической безопасности на водном транспорте.

Результаты (Results)

Перспективная низкочастотная радионавигационная система дальнего действия e-Loran обеспечивает аналогичную ГНСС навигацию по местоположению, времени и частоте при полном отсутствии режимных сбоев. Импульсы сконструированы таким образом, чтобы позволить приемнику различать компоненты поверхностной и пространственной волн в принимаемом составном сигнале. Таким образом, сигналы e-Loran могут использоваться на очень больших расстояниях без неопределенности в измерении времени распространения.

Система e-Loran была разработана с учетом требований к входу в морскую гавань. Технические характеристики системы и многочисленные испытания, проведенные за последнее десятилетие, показали, что e-Loran в реальности соответствует точности 10 м, предусмотренной требованием Резолюции ИМО А.953 к будущим системам ГНСС [11]. Когда для определения местоположения используется e-Loran, требуется минимум три станции для расчета двумерной фиксации местоположения с учетом временных задержек прохождения радиосигнала. Любые дополнительные измерения позволяют повысить общую точность решения. Как оптимальный вариант, например, могут быть дополнительно использованы возможности корреляционно-экстремальной навигации [17]. Чтобы достичь высокоточного уровня точности в морской среде, пользовательский приемник корректирует свои измерения с помощью опубликованных значений *дополнительных вторичных факторов* (Additional Secondary Factors — ASF) в качестве дифференциальных поправок e-Loran. Карты ASF для конкретных географических районов распространяются среди пользователей в независимом от получателя формате данных, а картографические данные публикуются провайдером морских услуг, ответственным за средства навигации. Измеренные значения *дополнительных вторичных факторов* остаются стабильными в течение длительного периода времени. Любые изменения опубликованных ASF, из-за изменений характеристик распространения радиоволн или задержек, связанных с передатчиком, будут компенсированы дифференциальными поправками. Для этого на берегу, в доступных пределах интересующего географического района, устанавливается дифференциальная станция e-Loran. Опорная станция сравнивает измеренные значения ASF с опубликованными аналогами и передает исправления пользователям по каналу передачи данных e-Loran.

Опорная станция вычисляет дифференциальные поправки для набора измерений дальности e-Loran и передает их пользователям в виде сообщений с двумя поправками. Время обновления сообщения составляет 120 с для полного набора дифференциальных исправлений от одной дифференциальной станции e-Loran. В структуре e-Loran установлено оборудование для контроля целостности в целях обеспечения высокой точности первоначальных эксплуатационных возможностей [6]. Аппаратура целостности каждые 10 с сравнивает дифференциальные поправки от опорной станции со своим собственным набором поправок, подавая сигнал тревоги, если разница между поправками

превышает пороговое значение. Кроме того, при практическом использовании целостности данных применяются поправки к собственным измерениям, получаемые по каналу передачи данных e-Logan. Если разница между расчетным и наблюдаемым положениями превышает предел защиты, традиционно устанавливаемый на уровне 25 м, то подается блокирующий сигнал и дифференциальная служба e-Logan не может быть использована [4]. Целесообразно феномен целостности рассматривать как критерий для оценки надежности и измерения уровня доверия к информации. Навигационная система с высокой степенью целостности должна быть способна обнаруживать и отклонять ошибочные измерения с целью обеспечения достоверности показателей работы РНС в любое время и при любых условиях. Поэтому целостность необходимо понимать как способность системы радионавигации обеспечивать своевременные предупреждения о невозможности использования этой системы в навигационных целях.

Несмотря на устойчивость к подавлению сигнала, точность позиционирования e-Logan условно остается ниже, чем у GPS. Задержка сигнала из-за помех наземного пути распространения радиоволн, которая называется *дополнительным вторичным фактором* (ASF), является наиболее уязвимой составляющей точности позиционирования e-Logan. Вследствие указанной проблемы необходимо учитывать временные и пространственные ошибки ASF для обеспечения высокой точности. Генерация карт на основе данных обследования ASF в зоне обслуживания является наиболее перспективным способом уменьшения пространственной ошибки ASF, но качество карт ASF зависит от применяемого алгоритма интерполяции. Целесообразно создавать высококачественные карты на основе измерений ASF только в фиксированных точках измерительных операций, поскольку обширные обследования ASF являются дорогостоящими и трудоемкими и требуют значительных технологических усилий [18].

Карта ASF для гавани и района подхода к гавани, как правило, содержит номинальные значения дополнительного вторичного фактора для каждого передатчика e-Logan. Наглядно карта ASF может быть представлена в виде наложенной сетки со значениями дополнительных вторичных факторов для каждой ее ячейки. Картографическая проекция является результатом обследования, которое необходимо точно провести один раз, прежде чем начнет функционировать дифференцированная служба e-Logan с последующими ежегодными регулярными интервалами обновления. Приемник дифференциального e-Logan позволяет морскому пользователю принимать на борту моделированную карту ASF. Разработка системы e-Logan в условиях современности трансформировалась в d-Logan как систему генерации информации об исправлении ошибок и предоставления пользователям данных по аналогии с системой DGPS. Дифференциальный e-Logan передает корректирующую информацию пользовательским приемникам путем извлечения номинального ASF, который является долгосрочным средним значением временного дополнительного вторичного фактора [19].

ASF можно условно разделить на номинальный, пространственный и временной уровень. Номинальный уровень ASF рассчитывается с использованием среднего значения фактических измерений за период измерения, составляющий не менее одного года с учетом сезонного цикла изменений на пути распространения трассы радиосигнала от каждой передающей станции с учетом географического местоположения d-Logan. Сгенерированный номинальный ASF передается на пользовательские приемники. Пространственный уровень ASF индивидуально создает карту дополнительных вторичных факторов для каждой передающей станции. Пространственный ASF определяется путем вычисления относительного значения для номинального ASF в каждой ячейке карты-сетки для всей зоны покрытия целевого сегмента d-Logan. С целью коррекции ASF в памяти каждого пользовательского приемника должна быть сгенерирована карта ASF. Наилучшим методом получения пространственной ASF является использование измеренной ASF в соответствующем районе. На временной уровень ASF оказывают влияние факторы окружающей среды. Например, временные значения ASF варьируются в зависимости от дня и ночи или между летом и зимой. Поэтому наиболее подходящим методом учета временного параметра является передача информации об исправлении ошибок в режиме реального времени. В отличие от ASF, обусловлен-

ной пространственными характеристиками, временная ASF обладает низкой чувствительностью к положению приемников и имеет большую зону покрытия информацией об исправлении ошибок.

Представляется целесообразным синтезировать структуру карты ASF на основе разработанного алгоритма гибридной двумерной *B*-сплайновой аппроксимации [20]. Ежегодная корректировка карты дополнительных вторичных факторов с позиций сплайнового подхода не представляет математических проблем. В случае обнаружения расхождений измерительных данных с принятой моделью автоматически возникнет необходимость реконструкции карты ASF. Эффекты аномальных пульсаций измерительных значений дополнительных вторичных факторов оптимальным образом могут учитываться при использовании унифицированного сплайнового синтеза без какого-либо алгоритмического переформатирования при возможности корректировки файла исходных данных. На основе новой информации измерений уточненная форма карты ASF будет пересчитана высокоскоростным методом *B*-сплайновой аппроксимации без каких-либо конструктивных сложностей. Обновления информации на основе методов *B*-сплайнов позволяют использовать в практических приложениях e-Loran уточненную синтезированную изогеометрию карты ASF практически в режиме реального времени.

Точная карта базы данных по ASF необходима в случае, если e-Loran должен обеспечить абсолютную точность навигации, требуемую при входе в морскую гавань. В 2013 г. был проведен интересный вычислительный эксперимент в рамках академических исследований в южнокорейском заливе Йонгиль по корректности технологии картирования дополнительных вторичных факторов для передающей станции Пхохан с установлением корреляции погрешности местоопределения в зависимости от точности графического синтеза ASF информации как учета фактического воздействия радиосреды. Применялись методы экстраполяции и линейной интерполяции для вычисления промежуточных репрезентативных значений задержки прохождения радиосигнала с целью имитационного моделирования ASF карты в соответствии с реперными измерениями, выполненными в двенадцати локациях целевой области исследования согласно схеме, приведенной на рис. 3 [21].

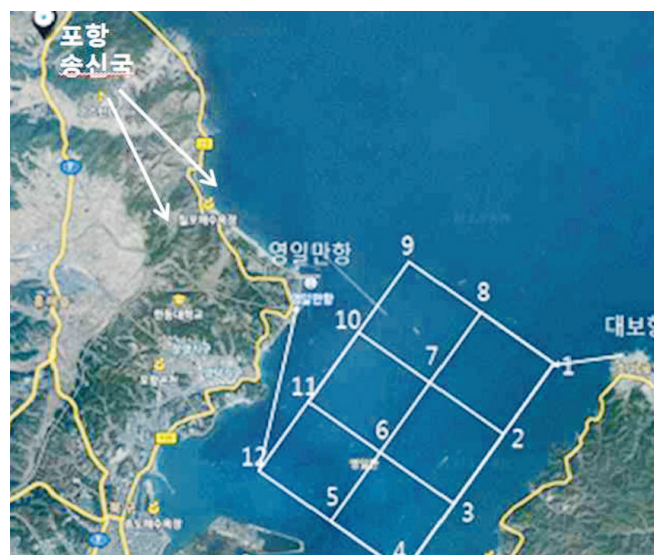


Рис. 3. Схема локационного картирования дополнительных вторичных факторов южнокорейской станции e-Loran в Пхохан

Применимость линейного интерполирования обусловлена упрощенной постановкой задачи и наличием регулярных измерительных данных. Линейное интерполирование стратегически уступает методам сплайн-функций в вопросе точности из-за конструктивных математических ограничений [22]. Геометрический характер прямой линии обладает нежелательными последствиями в вопросе точности интерполирования из-за невозможности применимости процедуры

«сглаживания», что является важным обстоятельством, если в измерениях присутствует погрешность. Негатив линейного интерполянта выражается в провоцировании «лестничного эффекта» при компьютерной визуализации графических приложений.

Поскольку при подборе аппроксиманта в постановке задачи оптимальности моделирования ASF карты всегда требуется дифференцируемая функция, принципиально исключающая точки геометрического разрыва, следует обратиться к кубическим сплайнам как чрезвычайно гибкой конструкции, позволяющей осуществить наилучшие математические приближения. В ситуации хаотичности данных, отражающей современную реальность измерительных процедур, аппроксимационный сплайн может выполнить лидирующую роль в реализации задачи составления ASF карты. При сравнительной характеристике линейного интерполирования с методами аппарата сплайн-функций предпочтение следует отдать кусочной аппроксимации. Оперирование с сегментированными многозвенниками является эффективным с точки зрения проведения вычислений. Расчет сплайн-функций сопряжен только с такими математическими операциями, как умножение и сложение, что обуславливает высокую результирующую точность.

Положительным аспектом применения сплайнов являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость расчетных кусочно-аппроксимационных процедур. Сплайны представляют собой универсальное математическое средство синтеза ASF карты по дискретным измерениям хронометражной задержки распространения радиосигнала ввиду независимости от конкретного вида фиксируемого параметра. Формат функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными скалярными сплайновыми коэффициентами и сеточными координатами для вычисления в масштабе реального времени значения дополнительного вторичного фактора по номеру сеточного интервала. Поэтому сплайновые аппроксимации являются высокоскоростным средством решения задач автоматизированной обработки навигационной информации системы e-Logan.

В результате южнокорейского эксперимента была получена синтезированная карта ASF с учетом коррекции прогнозируемых результатов с измеренными показателями хронометражной задержки распространения радиосигнала в наносекундах, представленная в цветовой гамме на рис. 4 [21].

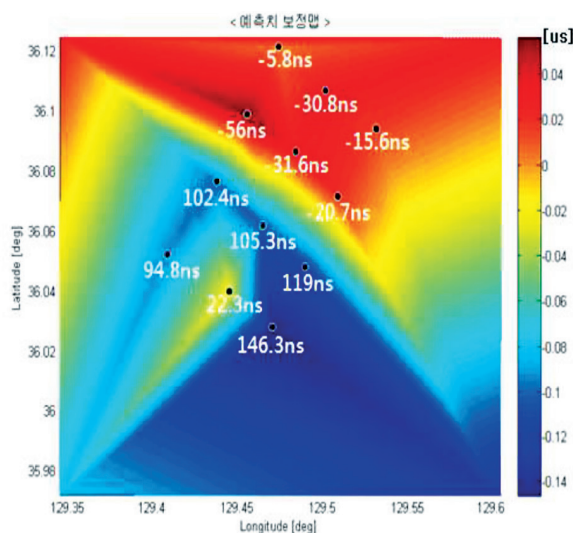


Рис. 4. Цветная синтезированная карта ASF для залива Йонгиль

В данном случае цветовая палитра является условным аналогом трехмерности измерительных результатов. Погрешность измерения картирования составила менее 9 м, что гарантирует изначально запланированную общую точность позиционирования южнокорейского проекта в 20 м, удовлетворяя в полной мере навигационным характеристикам системы e-Logan [21]. При фиксированном шаге в 500 м географической сетки как полигона экспериментальных измерений для прогностической

карты ASF погрешность времени прохождения радиосигнала составляет менее 0,03 нс [21]. Фактические измерения временных задержек выполнялись на основе хронометража цезиевых атомных часов. Повторный эксперимент, выполненный в 2014 г., позволил выявить, что при установке справочной станции на мысе Гомигот с целевым оперированием в пределах залива Йонгиль как дополнительного источника информации для передающей станции Пхохан можно гарантированно добиться точности определения местоположения от 8 до 20 м при условии соблюдения возможности корректуры карты ASF на приемнике пользователя [23]. По данным специального эксперимента 2020 г., проведенного в Юго-Восточной Азии, характеристики позиционирования e-Logan, скорректированные с использованием временного параметра ASF, составили приблизительно 12 м [24].

Использование сплайн-функций как алгоритма синтеза ASF карты может позволить существенно улучшить коррелированную погрешность позиционирования. С целью демонстрации практической реализуемости сплайнового алгоритма в аспекте обеспечения максимальной точности дифференциального варианта e-Logan выполнена компьютерная визуализация картографического фрагмента *дополнительных вторичных факторов* южнокорейского залива Йонгиль на основе гибридной *B*-сплайновой аппроксимации. В качестве цифровой сеточной основы сплайновой технологии использовалась матрица размером 3×4 с реперными данными по широте и долготе при общем количестве двенадцати узловых точек согласно рис. 4. С математической точки зрения скриншот, представленный на рис. 6, является трехмерным представлением картографированной изоповерхности задержки времени прохождения в наносекундах сигнала от передающей станции e-Logan в Пхохан.

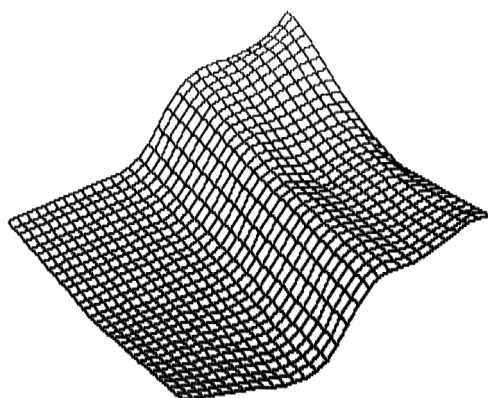


Рис. 5. Скриншот сплайн-картированной изоповерхности дополнительных вторичных факторов южнокорейского залива Йонгиль (результат работы авторского программного обеспечения)

При сопоставлении рис. 4 и 5 определяется информационная идентичность при учете разного формата представления информации. Внимательный анализ одного и того же изображения с различиями геометрической размерности подтверждает достоверность моделирования фрагмента сплайновой изоповерхности дополнительных вторичных факторов южнокорейского залива Йонгиль. Представление информации задержки распространения радиосигнала на рис. 4 дается в цветовой палитре в плоскостном варианте, а рис. 5 синхронно демонстрирует аналогичные данные в графике черно-белого цвета 3D формата. По сути, воссоздана ситуация практического использования трехмерной карты ASF при исследовании вопроса функционирования дифференциального e-Logan для морских применений. С целью гладкого приближения сплайновой изоповерхности использовались 24 добавочных точки по каждой координате на фрагментированном гридированном полигоне по рис. 3. Добавочные точки интерполяции выбирались каждый раз строго посередине сеточного интервала текущей расстановки сплайновых узлов, согласно *схеме Марсдена*, на основе метода деления пополам каждого композитного сеточного интервала. Геометрический фактор синтезированной изоповерхности, позволяющий осуществить центровку компьютерного изображения

в случае смещения граничных участков изоповерхности за фактические размеры компьютерного экрана, был задан равным безразмерному значению 68 ввиду необходимости корректной фиксации перепада измерительных данных из отрицательной области значений в положительную.

Положительный результат моделирования, полученного на основе фактической карты дополнительных вторичных факторов, может быть использован в качестве высокоточного эталона информативности в аспекте организации точного альтернативного позиционирования при уникальном представлении задержки прохождения радиосигнала на мониторе бортового компьютера аппаратуры e-Logan. Апробированный с использованием методов сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу при реализации процедуры визуальной оценки правильности учета поправок дифференциального режима e-Logan.

Проведением специально организованного эксперимента установлено, что сплайновая вычислительная погрешность при расчете любого навигационного параметра составляет порядок точности до шестого знака после запятой [25]. Точная графическая информация ASF является важнейшим условием эффективной эксплуатации системы e-Logan в дифференциальном варианте.

Система дальней навигации e-Logan может служить дополнением или альтернативой к уязвимым к радиочастотным помехам традиционным ГНСС. Синтезируемое математическими методами картирование отличается от стандартной карты ASF, основанной на времени прибытия, которая в настоящее время не подходит для Южной Кореи, поскольку южнокорейские передатчики e-Logan не синхронизированы со Всемирным координированным временем [26]. Карта дополнительных вторичных факторов, основанная на разнице во времени прибытия радиосигналов, создается с целью повышения точности позиционирования e-Logan в Южной Корее. В 2023 г. были замечены попытки применения южнокорейскими учеными кубического сглаживающего сплайна с целью синтеза данных ASF. В результате апробирования алгоритма кусочных аппроксимаций установлено, что *метод сглаживающего сплайна* имеет преимущество в подгонке нелинейных данных с помощью весовых коэффициентов в сравнении с полиномиальной регрессией. Сплайновый подход в южнокорейском сценарии продемонстрировал погрешность определения местоположения примерно на 2 м меньше, чем стандартный подход, основанный на применении линейной интерполяции [13].

В настоящее время проводятся интенсивные научные поиски по улучшению характеристик позиционирования e-Logan. В одном из таких исследований был предложен *метод многоцепочечного позиционирования*, который использует сигналы передающих станций, принадлежащих к разным группам. Несмотря на то, что производительность улучшенного Logan превосходит производительность традиционных методов, дополнительный вторичный фактор все еще может снизить точность позиционирования [24]. Чтобы нивелировать последствия временной компоненты ASF, судну в любом случае необходимо получать данные временной коррекции с ближайшей опорной станции с известным местоположением.

Трехмерное сплайновое картографирование дополнительного вторичного фактора с реализацией на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа расширяет горизонт ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации как процесса альтернативного позиционирования с применением элементов виртуальной реальности для возможности повышения надежности контроля местоположения за счет наглядности визуального оценивания правильности использования поправок дифференциального варианта e-Logan.

Обсуждение (Discussion)

Трансарктические маршруты становятся все более судоходными в ответ на быстрое сокращение площади морского льда за последние десятилетия. Появляется стимул для открытия новых морских коммерческих маршрутов, соединяющих Азию с Европой и Северной Америкой. Открытие северных маршрутов могло бы значительно сократить навигационные расстояния и время морских перевозок при экономии транспортных расходов и обеспечить существенные экологические выгоды [27].

Наибольший потенциал для развития среди мировых маршрутов приобретает Северный морской путь (СМП), расположенный вдоль побережья Российской Федерации и имеющий перспективу круглогодичного судоходства между крупнейшими портами Азии и Северной Европы по значительно более короткому маршруту по сравнению с традиционными. Навигационное использование РНС e-Loran в качестве альтернативы глобальной навигационной спутниковой системе (ГЛОНАСС) на трассе СМП представляется актуальной необходимостью в условиях перспективного судоходства в Арктике. Ввиду того, что зону СМП полностью покрывает ГЛОНАСС, российская спутниковая система может стать приоритетной целью злоумышленной спуфинг-атаки. С российской стороны активно продвигается развитие СМП как альтернативы Суэцкому каналу. Несмотря на сложные навигационные условия северный вариант морского пути из Азии в Европу имеет ряд преимуществ, таких как меньшая протяженность пути, экономия топлива, отсутствие опасности пиратских нападений, движение в зоне юрисдикции одного государства, незначительные финансовые издержки ледокольного сопровождения.

Событие 23 марта 2021 г. спровоцировало остановку мирового грузооборота на 8–12 % за семь дней ввиду посадки на мель судна Ever Given в Суэцком канале [28]. Резонанс данного инцидента выразился не только в блокировке движения по центральному маршруту между Европой и Азией, а также в том, что судовладелец получил финансовую претензию в размере 916 млн долл. Прецедент ситуации заключается в том, что одна авария может привести к транспортному коллапсу с ущербом мировой торговле в 400 млн долл. в час. Аналогичная авария может дискредитировать эксплуатацию СМП как безопасного судоходного пути с серьезными экологическими последствиями. Репутация нового проекта в начале его развития является решающим фактором для его дальнейшего эффективного использования. Однако помимо преимуществ арктических маршрутов имеется множество препятствий для судоходства. Поэтому необходимо решать вопросы безопасности и создавать перспективные навигационные системы надежного позиционирования. Вследствие этого, безусловно, важным является практическая разработка альтернативного местоопределения в варианте системы e-Loran для гарантированного обеспечения безопасности судовождения на трассе СМП, представляющего собой идеальное место для навигационного использования системы e-Loran. В связи с тем, что трасса СМП проходит через малонаселенные районы, установка станций e-Loran может обеспечить жизненно необходимые коммуникации в ситуации локальной недееспособности спутниковых средств связи. Это особенно важно в условиях Арктики, где сложные погодные условия могут нарушить работу технического оборудования и связи. Благодаря системе e-Loran будут обеспечены точность и надежность связи во всей арктической зоне. При этом необходимо отметить, что применение системы e-Loran на СМП является стратегией развития северных территорий и в целом будет способствовать укреплению позиций Российской Федерации в Арктике. Внедрение инновации e-Loran в арктической зоне будет способствовать повышению эффективности судоходства, а также снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций в сложных обстоятельствах плавания. Как важнейший аспект государственной политики в Арктике развитие транспортной инфраструктуры СМП принесет значительную пользу экономике проблемного региона.

В проекте e-Loran в целях экономической эффективности следует максимально использовать имеющуюся инфраструктуру радиотехнической системы дальней навигации (РСДН). Так как в западной части СМП уже фактически установлены станции РНС, расположенные по оптимальному геометрическому фактору, соответствующие по всем условиям эффективного пересечения градиентов, предлагается использовать e-Loran в качестве *системной основы позиционирования*. Установка новых станций РСДН требует больших материальных затрат. С целью уменьшения себестоимости проекта частично можно использовать уже имеющуюся инфраструктуру РСДН «Чайка». Учитывая необходимость установки новых станций e-Loran в арктической части РФ, их расположение должно обеспечивать близость к населенным пунктам для управления работой станции, технического обслуживания и ремонта. Ввиду того, что это не всегда может быть осуществимо, станции e-Loran должны быть максимально автономными с минимальным количеством технического персонала,

иметь устойчивое к местным погодным условиям оборудование при условии возможности дистанционного управления и контроля станции.

По аналогии с исследованием, активно проводимым в Южной Корее, в приоритете должно быть коллекционирование статистических данных по изменению ASF в процессе прохождения радиосигнала над арктической сушей. Безусловно, для создания целостной карты определенных поправок ASF потребуется огромное количество времени и ресурсов, поэтому выдвигается гипотеза производить не точечные замеры, а интерпретировать полученные данные на единое поле поправок *методом сплайн-функций*.

Морские перевозки в арктических морях увеличиваются ввиду изменения климата по причине прогнозируемого глобального потепления. Таяние морского льда привело к широко распространенному мнению о том, что судоходство будет быстро расширяться с актуализацией поиска более коротких морских путей между Европой и Азией. Экономия расстояния, которую можно достичь с помощью арктических маршрутов в условиях современности, с финансовой точки зрения нецелесообразно игнорировать. Например, расстояние между Лондоном и Иокогамой через Северо-Западный проход составляет 15700 км, а через Северо-Восточный проход — 13841 км, что значительно меньше маршрута через Суэцкий (21200 км) или Панамский канал (23300 км) [29]. В некоторых случаях расстояния плавания по арктическому маршруту сокращаются примерно на 25–30 %, что является важнейшим фактором, стимулирующим потенциал быстрой интенсификации судоходства в арктическом регионе. Финансовый профицит на некоторых северных маршрутах является значительным, и он будет служить стимулом будущего развития. Если прогнозы относительно потенциального растущего трафика на долгосрочную перспективу оправдаются, то СМП может стать реальным конкурентом Суэцкому и Панамскому каналам, Малаккскому и Сингапурскому проливам при геополитическом усилении суверенитета Российской Федерации.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Становится возможным признать функционал РНС e-Loran как лучшую альтернативу ГНСС в аспекте сопоставимой точности обсерваций с достигнутым потенциалом местоопределения 8–20 м с прогнозируемой перспективой уменьшения погрешности геолокации ниже 5 м.
2. Применение системы e-Loran на трассе СМП эффективным образом обеспечит безопасность судоходства в арктической зоне РФ.
3. Синтезирование карты дополнительных вторичных факторов на основе методов *B*-сплайновой аппроксимации позволит получить точностные характеристики позиционирования e-Loran идентичные геолокации ГНСС.
4. Приведенный скриншот изоповерхности дополнительных вторичных факторов южнокорейского залива Йонгиль может служить доказательством работоспособности сплайнового алгоритма картирования поправок задержки распространения радиосигнала в системе e-Loran.
5. Применение поправок к измерениям, получаемым по каналу передачи данных d-Loran, необходимо рассматривать как практическое использование феномена целостности данных с целью обеспечения высокоточного позиционирования в режиме реального времени.
6. Разработанный пакет прикладных паскаль-программ обеспечения картографирования ASF методом сплайн-функций с реализациями на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа может выступить в роли интеллектуальной поддержки принятия решений вахтенным помощником в апостериорной оценке точности обсервации за счет наглядности визуального представления поля поправок дифференциального варианта e-Loran.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pelgrum W. J. New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century: PhD dissertation / W. J. Pelgrum. — Netherlands: Delft University of Technology, 2006. — 295 p.

2. *Czaplewski K.* The Identification of Possible Applications of the E-Loran System / K. Czaplewski, A. Weintrit // Annual of Navigation. — 2018. — No. 25. — Pp. 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
3. *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.
4. *Offermans G.* eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom — First Results / G. Offermans, E. Johannessen, S. Bartlett, C. Schue, A. Grebnev, M. Bransby, P. Williams, C. Hargreaves // Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. — ION, 2015. — Pp. 27–39.
5. *Schmidt G. T.* GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments / G. T. Schmidt // Gyroscopy and Navigation. — 2019. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 41–53. DOI: 10.1134/S207510871902007X.
6. *Ююкин И. В.* Опportunистическая 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.
7. *Williams P.* e-Navigation and the Case for eLoran / P. Williams, S. Basker, N. Ward // The Journal of Navigation. — 2008. — Vol. 61. — Is. 3. — Pp. 473–484. DOI: 10.1017/S0373463308004748.
8. *Offermans G.* Providing a resilient timing and UTC service using eLoran in the United States / G. Offermans, S. Bartlett, C. Schue // Navigation: Journal of The Institute of Navigation. — 2017. — Vol. 64. — Is. 3. — Pp. 339–349. DOI: 10.1002/navi.197.
9. *Clements Z.* Dual-Satellite Geolocation of Terrestrial GNSS Jammers from Low Earth Orbit / Z. Clements, T. E. Humphreys, P. Ellis // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). — IEEE, 2023. — Pp. 458–469. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140058.
10. *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.
11. *Son P. W.* eLoran: Resilient positioning, navigation, and timing infrastructure in maritime areas / P. W. Son, S. G. Park, Y. Han, K. Seo // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — Pp. 193708–193716. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033215.
12. *Fang T. H.* Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter / T. H. Fang, Y. Kim, D. Kim, S. Lee, K. Seo, S. H. Park // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. — 2018. — Vol. 24. — No. 8. — Pp. 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0079.
13. *Kim W.* First Demonstration of the Korean eLoran Accuracy in a Narrow Waterway Using Improved ASF Maps / W. Kim, P. W. Son, S. G. Park, S. H. Park, J. Seo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2022. — Vol. 58. — Is. 2. — Pp. 1492–1496. DOI: 10.1109/TAES.2021.3114272.
14. *Rhee J. H.* Enhanced Accuracy Simulator for a Future Korean Nationwide eLoran System / J. H. Rhee, S. Kim, P. W. Son, J. Seo // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 115042–115052. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3105063.
15. *Son P. W.* Demonstration of the Feasibility of the Korean eLoran System as a Resilient PNT in a Testbed / P. W. Son, S. G. Park, Y. Han, K. Seo, T. H. Fang // Remote Sensing. — 2023. — Vol. 15. — Is. 14. — Pp. 3586. DOI: 10.3390/rs15143586.
16. *Yan B.* High-Accuracy Positioning Based on Pseudo-Ranges: Integrated Difference and Performance Analysis of the Loran System / B. Yan, Y. Li, W. Guo, Y. Hua // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — Is. 16. — Pp. 4436. DOI: 10.3390/s20164436.
17. *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.
18. *Son P. W.* Universal Kriging for Loran ASF Map Generation / P. W. Son, J. H. Rhee, J. Hwang, J. Seo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2018. — Vol. 55. — Is. 4. — Pp. 1828–1842. DOI: 10.1109/TAES.2018.2876587.
19. *Choi Y. S.* A Study on the ASF Correction Age and Error for Effective eLORAN Data Channel Utilization in Korea / Y. S. Choi, S. W. Hwang, S. R. Yeo, C. Park, S. H. Yang, S. J. Lee // Journal of Positioning, Navigation, and Timing. — 2013. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 109–114. DOI: 10.11003/JKGS.2013.2.2.109.

20. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
21. Hwang S. W. A generation method of ASF mapping by the predicted ASF with the measured one in the Yeongil Bay / S. W. Hwang, M. Y. Shin, Y. S. Choi, D. Yu, C. Park, S. H. Yang, C. B. Lee, S. J. Lee // Journal of Navigation and Port Research. — 2013. — Vol. 37. — Is. 4. — Pp. 375–381. DOI: 10.5394/KINPR.2013.37.4.375.
22. 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.
23. Lee C. B. dLoran Measurement in Yeongil Bay using the Pohang Loran-C (9930M) / C. B. Lee, J. K. Lee, Y. K. Lee, S. W. Hwang, S. J. Lee, S. H. Yang // Journal of Navigation and Port Research. — 2014. — Vol. 38. — Is. 3. — Pp. 227–232. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.3.227.
24. Park J. Effect of Outlier Removal from Temporal ASF Corrections on Multichain Loran Positioning Accuracy / J. Park, P. W. Son, W. Kim, J. H. Rhee, J. Seo // 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). — IEEE, 2020. — Pp. 824–826. DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268214.
25. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Loran в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
26. Hwang J. TDOA-based ASF Map Generation to Increase Loran Positioning Accuracy in Korea / J. Hwang, P. W. Son, J. Seo // 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia). — IEEE, 2018. — Pp. 206–212. DOI: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552129.
27. Cao Y. Review of navigability changes in trans-Arctic routes / Y. Cao, M. Yu, F. Hui, J. Zhang, X. Cheng // Chinese Science Bulletin. — 2021. — Vol. 66. — Is. 1. — Pp. 21–33. DOI: 10.1360/TB-2020-0596.
28. Цмай В. В. Актуальные вопросы правового регулирования международных коммерческих морских перевозок / В. В. Цмай // Океанский менеджмент. — 2022. — № 1 (15). — С. 56–59.
29. Guy E. Commercial shipping in the Arctic: new perspectives, challenges and regulations / E. Guy, F. Lasserre // Polar Record. — 2016. — Vol. 52. — Is. 3. — Pp. 294–304. DOI: 10.1017/S0032247415001011.

REFERENCES

1. Pelgrum, Wouter Johan. New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century. PhD Diss. Netherlands: Delft University of Technology, 2006.
2. Czaplewski, Krzysztof, and Adam Weintrit. “The Identification of Possible Applications of the E-Loran System.” *Annual of Navigation* 25 (2018): 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
3. 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.
4. Offermans, Gerard, Erik Johannessen, Stephen Bartlett, Charles Schue, Andrei Grebnev, Martin Bransby, Paul Williams, and Chris Hargreaves. “eLoran Initial Operational Capability in the United Kingdom — First Results.” *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. ION, 2015. 27–39.
5. Schmidt, George T. “GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments.” *Gyroskopy and Navigation* 10.2 (2019): 41–53. DOI: 10.1134/S207510871902007X.
6. 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.
7. Williams, Paul, Sally Basker, and Nick Ward. “e-Navigation and the Case for eLoran.” *The Journal of Navigation* 61.3 (2008): 473–484. DOI: 10.1017/S0373463308004748.
8. Offermans, Gerard, Stephen Bartlett, and Charles Schue. “Providing a resilient timing and UTC service using eLoran in the United States.” *Navigation: Journal of The Institute of Navigation* 64.3 (2023): 339–349. DOI: 10.1002/navi.197.
9. Clements, Zachary, Todd E. Humphreys, and Patrick Ellis. “Dual-Satellite Geolocation of Terrestrial GNSS Jammers from Low Earth Orbit.” *2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 2023. 458–469. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140058.
10. 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.

11. Son, Pyo-Woong, Sul Gee Park, Younghoon Han, and Kiyeol Seo. "eLoran: Resilient positioning, navigation, and timing infrastructure in maritime areas." *IEEE Access* 8 (2020): 193708–193716. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3033215.
12. Fang, Tae Hyun, Youngki Kim, Don Kyu Kim, Sangheon Lee, Ki-Yeol Seo, and Sang Hyun Park. "Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter." *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 24.8 (2018): 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0079.
13. Kim, Woohyun, Pyo-Woong Son, Sul Gee Park, Sang Hyun Park, and Jiwon Seo. "First Demonstration of the Korean eLoran Accuracy in a Narrow Waterway Using Improved ASF Maps." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 58.2 (2022): 1492–1496. DOI: 10.1109/TAES.2021.3114272.
14. Rhee, Joon Hyo, Sanghyun Kim, Pyo-Woong Son, and Jiwon Seo. "Enhanced Accuracy Simulator for a Future Korean Nationwide eLoran System." *IEEE Access* 9 (2021): 115042–115052. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3105063.
15. Son, Pyo-Woong, Sul Gee Park, Younghoon Han, Kiyeol Seo, and Tae Hyun Fang. "Demonstration of the Feasibility of the Korean eLoran System as a Resilient PNT in a Testbed." *Remote Sensing* 15.14 (2023): 3586. DOI: 10.3390/rs15143586.
16. Yan, Baorong, Yun Li, Wei Guo, and Yu Hua. "High-Accuracy Positioning Based on Pseudo-Ranges: Integrated Difference and Performance Analysis of the Loran System." *Sensors* 20.16 (2020): 4436. DOI: 10.3390/s20164436.
17. 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.
18. Son, Pyo-Woong, Joon Hyo Rhee, Jaehui Hwang, and Jiwon Seo. "Universal Kriging for Loran ASF Map Generation." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 55.4 (2019): 1828–1842. DOI: 10.1109/TAES.2018.2876587.
19. Choi, Yun Sub, Sang-Wook Hwang, Sang-Rae Yeo, Chansik Park, Sung-Hoon Yang, and Sang Jeong Lee. "A Study on the ASF Correction Age and Error for Effective eLORAN Data Channel Utilization in Korea." *Journal of Positioning, Navigation, and Timing* 2.2 (2013): 109–114. DOI: 10.11003/JKGS.2013.2.2.109.
20. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
21. Hwang, Sang-Wook, Mi Young Shin, Yun Sub Choi, Donghui Yu, Chansik Park, Sung-Hoon Yang, Chang-Bok Lee, and Sang Jeong Lee. "A generation method of ASF mapping by the predicted ASF with the measured one in the Yeongil Bay." *Journal of Navigation and Port Research* 37.4 (2013): 375–381. DOI: 10.5394/KINPR.2013.37.4.375.
22. 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.
23. Lee, Chang-Bok, Jong Koo Lee, Young-Kyu Lee, Sang-Wook Hwang, Sang Jeong Lee, and Sung-Hoon Yang. "dLoran Measurement in Yeongil Bay using the Pohang Loran-C (9930M)." *Journal of Navigation and Port Research* 38.3 (2014): 227–232. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.3.227.
24. Park, Jongmin, Pyo-Woong Son, Woohyun Kim, Joon Hyo Rhee, and Jiwon Seo. "Effect of Outlier Removal from Temporal ASF Corrections on Multichain Loran Positioning Accuracy." *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. IEEE, 2020. 824–826. DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268214.
25. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
26. Hwang, Jaehui, Pyo-Woong Son, and Jiwon Seo. "TDOA-based ASF Map Generation to Increase Loran Positioning Accuracy in Korea." *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)*. IEEE, 2018. 206–212. DOI: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552129.
27. Cao, Yunfeng, Meng Yu, Fengming Hui, Jing Zhang, and Xiao Cheng. "Review of navigability changes in trans-Arctic routes." *Chinese Science Bulletin* 66.1 (2021): 21–33. DOI: 10.1360/TB-2020-0596.
28. Tsmay, V.V. "Current issues of commercial shipping legislations." *Okeanskiy menedzment* 1(15) (2022): 56–59.
29. Guy, Emmanuel, and Frederic Lasserre. "Commercial shipping in the Arctic: new perspectives, challenges and regulations." *Polar Record* 52.3 (2016): 294–304. DOI: 10.1017/S0032247415001011.

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 6 ноября 2023 г.
Received: November 6, 2023.*