

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715

NAVIGATIONAL USE OF THE E-LORAN SYSTEM IN MODIFICATION WITH THE SPLINE FUNCTIONS METHOD

I. V. Yuyukin

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

The issue of navigational use of E-LORAN as an alternative to GPS is considered. It is noted that when using the spline algorithms, there is a real possibility to automate the accelerated handling of navigation information in the electronic LORAN project on the standard base of onboard computer resources. The proposed approach becomes especially important in case of blocking access to GPS for marine civilian users in local military conflicts or in case of technical problems such as spoofing attacks, satellite signal jamming, or hostile ship control. System protection of the marine consumer from unauthorized simulated interference with GPS signals is an actual problem of cybernetic security of the navigation in the future when assessing the hacker impact on the target task of safely following the planned route for any marine mobile object. Since LORAN/E-LORAN is hyperbolic navigation system, the task of interpolating the classical hyperbola is performed in order to demonstrate the productivity of the developed algorithms. On the basis of a specially organized calculated experiment, the high accuracy of synthesizing the navigation isoline is proved. A sequence of four screenshots demonstrates the reliability of the obtained results of algorithmic functionality. Repurposing the proposed approach to the differential navigation mode allows us to directly use the grid of distorted hyperboles in practical applications, while conceptually ignoring the complexity of mathematical formalization of fictitious isolines. A retrospective algorithm in software implementation based on the least squares method for calculating the most probable coordinates of the ship position as an iterative search for the intersection point of spline hyperbolic isolines with a geometric interpretation of the assigned task solution is used in the paper. When navigational using of E-LORAN in a modification with spline functions, it becomes possible to abandon specialized electronic or traditional paper charts with the hyperbolic family, applying spline algorithmic and onboard software in order to eliminate the navigator participation in traditional interpolation on a hyperbolic grid-chart in order to fix the vessel position. It is concluded that the specific considered aspect of the spline functions method can be a stimulating factor for automated accelerated processing of navigation information.

Keywords: Spoofing-attack, satellite signal jamming, hostile ship control, cybernetic navigation security, assessment of the hacker impact, fictitious distorted isoline.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Navigational use of the e-LORAN system in modification with the 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.

УДК 656.61.052 656

НАВИГАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ E-LORAN В МОДИФИКАЦИИ С МЕТОДОМ СПЛАЙН-ФУНКЦИЙ

И. В. Ююкин

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

Рассматривается вопрос навигационного использования e-LORAN в качестве альтернативы GPS. Отмечается, что при применении сплайновых алгоритмов появляется реальная возможность автоматизации ускоренной обработки навигационной информации в проекте электронный LORAN на стандартной базе ресурсов бортового компьютера. Предлагаемый подход приобретает особую важность в случае блокирования доступа к GPS морским гражданским потребителям при наличии локальных военных конфликтов или возникновении технических проблем, таких как спуфинг-атака, глушение спутникового сигнала и враждебный контроль судна. Системная защита морского потребителя от несанкционированных имитационных помех сигналам GPS представляется актуальной проблемой кибернетической безопасности

навигации будущего при оценке хакерского воздействия на целевую задачу безопасного следования по запланированному маршруту для любого морского подвижного объекта. Поскольку LORAN/e-LORAN являются гиперболическими навигационными системами, выполнена задача интерполирования классической гиперболы с целью демонстрации работоспособности разработанных алгоритмов. На основе специально организованного вычислительного эксперимента доказана высокая точность синтезирования навигационной изолинии. Последовательность из четырех скриншотов демонстрирует достоверность полученных результатов алгоритмической функциональности. Перепрофилирование предлагаемого подхода на дифференциальный режим навигации позволяет непосредственно использовать в практических приложениях сетку искаженных поправками гипербол при концептуальном игнорировании сложности математической формализации фиктивных изолиний. В работе используется ретроспективный алгоритм в программной реализации на основе метода наименьших квадратов расчета вероятнейших координат места судна как итерационный поиск точки пересечения сплайновых гиперболических изолиний с геометрической интерпретацией решения поставленной задачи. При навигационном использовании e-LORAN в модификации со сплайн-функциями появляется возможность отказаться от специализированных электронных или традиционных бумажных карт с семейством гипербол, применяя сплайновое алгоритмическое и программное бортовое обеспечение с целью упразднения участия судоводителя в традиционном интерполировании на гиперболической карте-сетке для определения места судна. Сделан вывод о том, что конкретный рассматриваемый аспект метода сплайн-функций может явиться стимулирующим фактором автоматизированной ускоренной обработки навигационной информации.

Ключевые слова: спуфинг-атака, враждебный контроль судна, глушение спутникового сигнала, кибернетическая безопасность навигации, оценка хакерского воздействия, фиктивная искаженная изолиния.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Навигационное использование системы 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.

Введение (Introduction)

В мировом судоходстве до спутниковой навигации успешно применялась американская национальная система LORAN (Long Range Navigation). В 2010 г. было принято решение о прекращении передачи сигналов системы LORAN-C в связи с повсеместным внедрением перспективной системы GPS [1]. Однако в условиях современности международное морское сообщество пришло к пониманию необходимости введения дублирующего варианта обеспечения альтернативной навигации в случае различных технических проблем работы GPS [2]–[4]. Вследствие этого в середине 90-х гг. возобновилась разработка e-LORAN (enhanced LORAN) с переходом на цифровую обработку сигналов. Упраздненная система LORAN-C в XXI в. трансформируется в современность в презентации e-LORAN с прогнозируемым показателем точности, сопоставимым с точностью спутниковой навигации [5]. При этом инновацию e-LORAN планируется использовать как резервную систему GPS [6]. Благодаря техническим возможностям проект электронный LORAN уникальным образом подходит для дополнения GPS с потенциальной возможностью производства гибридных перспективных приемоиндикаторов [7].

При рассмотрении навигационного использования e-LORAN внимание было акцентировано исключительно на исследовании вопроса эффективной математической обработки навигационной информации. Технические аспекты модернизации проекта электронного LORAN не рассматриваются. При финальном введении в эксплуатацию e-LORAN в реализации полного объема возможностей системы ежедневная работа позволит реалистично выявить действительную корректность считающихся успешными алгоритмов, и альтернативный сплайновый подход может явиться действенным аспектом повышения функциональности нового инновационного проекта. Для апробирования навигационного использования e-LORAN в модификации с методами сплайн-функций сформулированы следующие задачи эффективной обработки навигационной информации:

1. Реализация высокоскоростного алгоритма классической полиномиальной сплайн-интерполяции изолинии системы e-LORAN.

2. Применение альтернативного алгоритма на основе базисных финитных сплайнов с обеспечением конструктивного сжатия массивов данных навигационных параметров.
3. Оценка точности сплайн-интерполяции навигационной изолинии.
4. Программная реализация для бортового компьютера сплайновых алгоритмов в двух предлагаемых вариантах.
5. Разработка алгоритма определения места судна с программным сопровождением на основе итерационного поиска точки пересечения синтезированных сплайновых изолиний.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для восстановления навигационной изолинии предлагаются два конкурирующих метода: полиномиальный подход сплайн-интерполяции и технология базисных финитных сплайнов. По первому варианту классический полиномиальный кубический сплайн на каждом сеточном отрезке $x \in [x_i, x_{i+1}]$ представляет собой многочлен третьей степени, генерирующий навигационную изолинию в интерполяционном коридоре точности [8]:

$$S_i(x) = A_i + B_i(x) + C_i(x)^2 + D_i(x)^3; i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

где A_i, B_i, C_i, D_i — неизвестные полиномиальные сплайновые коэффициенты, подлежащие математическому определению при каждом решении конкретной задачи;

N — общее количество узлов интерполяции.

Фактическое быстроедействие программной реализации классической сплайн-интерполяции достигается за счет оптимального представления формулы (1) по схеме Горнера с учетом факта вычислительной предпочтительности операции умножения взамен возведения в степень:

$$S_i(x) = [[D_i(x) + C_i](x) + B_i](x) + A_i; i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Вычисление скалярных сплайновых коэффициентов предполагает решение линейных алгебраических систем на основе использования метода прогонки [8].

По альтернативному второму варианту для B -сплайнового алгоритма условия интерполяции навигационной изолинии в произвольной точке $x \in [x_i, x_{i+1}]$ сеточного интервала аргумента реализуются на основе базисной финитной композиции [9]:

$$S(x) = c_{i-1}B_{i-1}(x) + c_iB_i(x) + c_{i+1}B_{i+1}(x) + c_{i+2}B_{i+2}(x); i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

где $B_i(x)$ — «шапочные» функции финитного сплайна;

c_i — искомые линейные функционалы;

N — общее количество узлов интерполяции.

Базисный сплайн или его полиномиальный аналог только организует математическую искусственную конструкцию, но не является фактическим фрагментом алгебраической кривой. Реальная математическая линия синтезируется путем умножения последовательности «функций-крыш» $B_i(x)$, в случае базисной интерполяции, на расчетные скалярные коэффициенты c_i как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала. Преимущество финитного сплайна по сравнению с классическим полиномиальным аналогом заключается в конструктивной возможности четырехкратного компактного сжатия сплайнового массива данных при одинаковых показателях характеристик точности [8].

При навигационном применении сплайновых алгоритмов появляется реальная возможность автоматизации обработки навигационной информации в концепции e-LORAN на базе вычислительных ресурсов бортового компьютера.

Результаты (Results)

LORAN/e-LORAN являются гиперболическими навигационными системами [1]. Для определения места судна при использовании гиперболических методов в практике судовождения дополнительно требуются специальные карты с графической сеткой изолиний, однако в случае применения методов сплайн-функций данная необходимость автоматически аннулируется, так

как задача математического генерирования любой промежуточной гиперболы и ее геометрического представления осуществляется вычислительным прогрессивным способом. При навигационном использовании e-LORAN в модификации со сплайн-функциями появляется реальная возможность избавить судоводителя от трудоемкого интерполирования на карте-сетке современного LORAN с целью определения места судна. При современном навигационном использовании e-LORAN в интеграционной среде ЭКНИС необходимо выполнение определенных условий для того, чтобы электронная карта стала полноценной официальной заменой бумажной карте. Игнорирование любого из этих условий возвращает судоводителя к обязательному использованию традиционной бумажной карты, и вопрос эффективного оперирования навигационными изолиниями в классическом понимании повторно приобретает актуальность.

Конкретный рассматриваемый аспект ускоренной обработки навигационной информации на основе сплайнового манипулирования гиперболической сеткой может стать фактором, позволяющим сконцентрировать внимание вахтенной службы на адекватной оценке обстановки, а не тратить вахтенное время на графическое интерполирование промежуточной гиперболы по карте-сетке. Апробированные на методах сплайн-функций алгоритмы могут стать гармонизированной поддержкой судоводительскому составу при принятии грамотного решения по управлению судном. При внешней условной тактической схожести с компьютерными играми разработанных графических приложений геометрическая интерпретация решения навигационных задач предоставляет возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии мгновенного определения места судна при любых обстоятельствах плавания.

Классический пример семейства гипербол, представленный на рис. 1, приведен в «Руководстве пользователя LORAN-C», изданном под кураторством Береговой охраны США [10]. В качестве доказательства работоспособности сплайнового подхода выполнено генерирование отдельной гиперболы с оцифровкой -400 с использованием гиперболической концепции LORAN-C как прототипа e-LORAN.

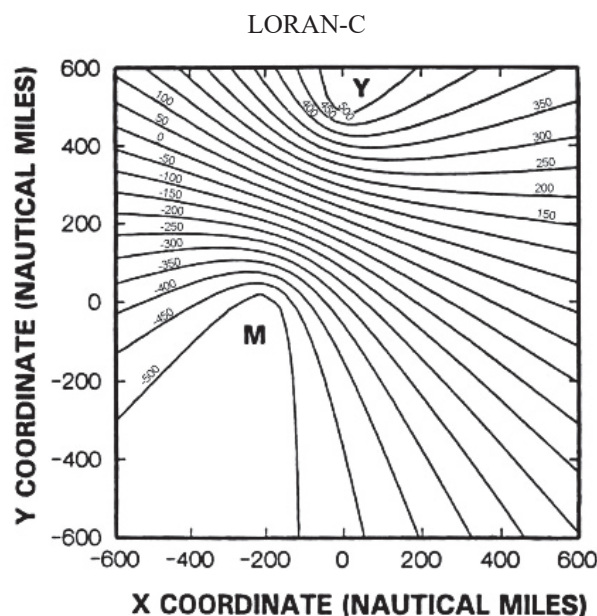


Рис. 1. Классическое семейство гипербол системы LORAN-C

На рис. 2 приведена гипербола, которая была генерирована методами полиномиальной сплайн-интерполяции по девяти узловым точкам, при глазомерной оценке оцифровки декартовой системы координат (см. рис. 1). Для достижения точности вычислительного эксперимента использовалось кратковременное увеличение масштаба рис. 1 с целью эффективного применения сеточного метода при последующем возвращении к оригинальному представлению семейства офици-

альных гипербол. На рис. 2 пунктирными линиями обозначена координатная нулевая позиция. При сравнительном анализе сплайновой гиперболы и изолинии с оцифровкой -400 по рис. 1 обнаруживается полная геометрическая идентичность с рис. 2.

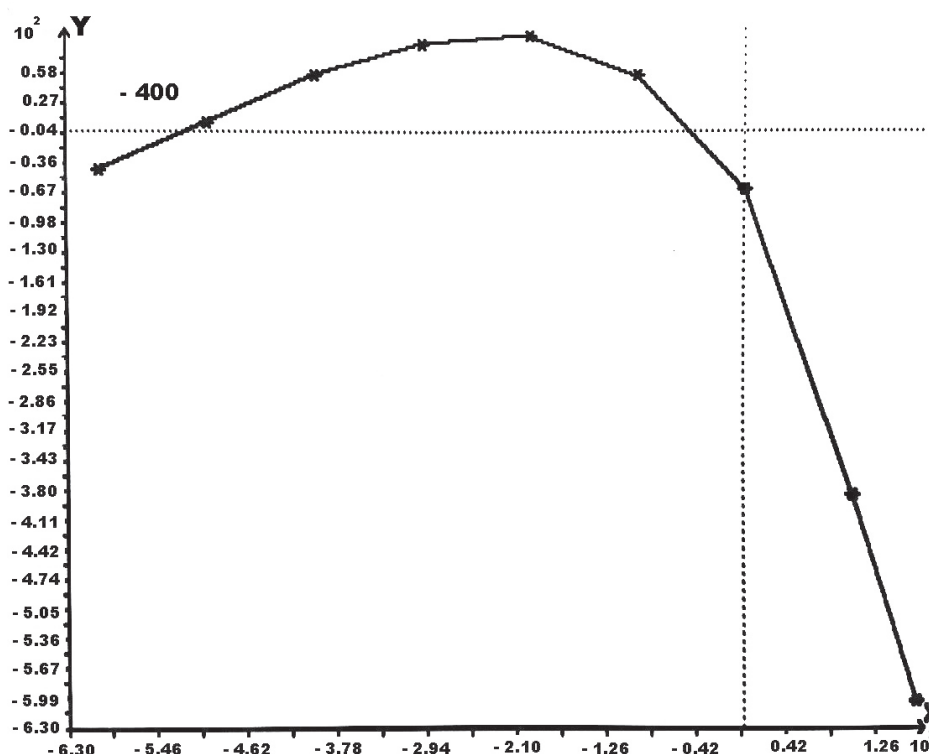


Рис. 2. Синтезирование гиперболической изолинии методом полиномиальной сплайн-интерполяции

В случае применения метода базисных сплайнов получена аналогичная первому методу геометрическая форма гиперболической изолинии. Акцент сделан на полиномиальном сплайновом методе (см. рис. 2), так как преимущества финитных сплайнов с организацией компактности данных проявляются в исключительной степени в 3D формате. Из-за конструктивной особенности базисной сплайновой структуры объем вычислительной информации сокращается в 4 раза при синтезировании навигационной изоповерхности по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции [11].

Совпадение по геометрии сплайновой изолинии с официальной изолинией по версии Береговой охраны США не является тривиальной демонстрацией. Интерполирование классической изолинии реализовано с целью демонстрации доказательства работоспособности новых алгоритмов. Схожесть сплайновой гиперболы с реальной является убедительным подтверждением правомерности применения методов сплайн-функций для морских приложений. Априорная оценка точности сплайн-интерполяции базируется на постановке смоделированного математического эксперимента для получения количественной характеристики обоснованности использования предложенного алгоритма.

В случае навигационного использования системы e-LORAN в модификации с методами сплайн-функций, по данным специально организованного эксперимента, априорная точность приближения навигационной изолинии составляет порядок точности до шестого знака после запятой для любого расчета навигационного параметра (рис. 3). На рис. 3, а представлен график оценки точности полиномиальной сплайн-интерполяции синуса, выбранной из соображения условной фрагментарной схожести с контуром гиперболы. Монотонную кривизну синусоиды в сегменте $[-\pi; +\pi]$ можно условно по геометрическому контуру интерпретировать как комбинацию «ветвей»

гиперболы с точкой соединения в нулевой координате двух геометрических фрагментов. Данный феномен автоматически реализует дополнительную усложненность вычислительного эксперимента с целью получения большей достоверности правдоподобия конечного результата оценки априорной точности интерполяции. При данной организации вычислительного эксперимента исключается проблема неустойчивости алгоритма в особых асимптотических точках.

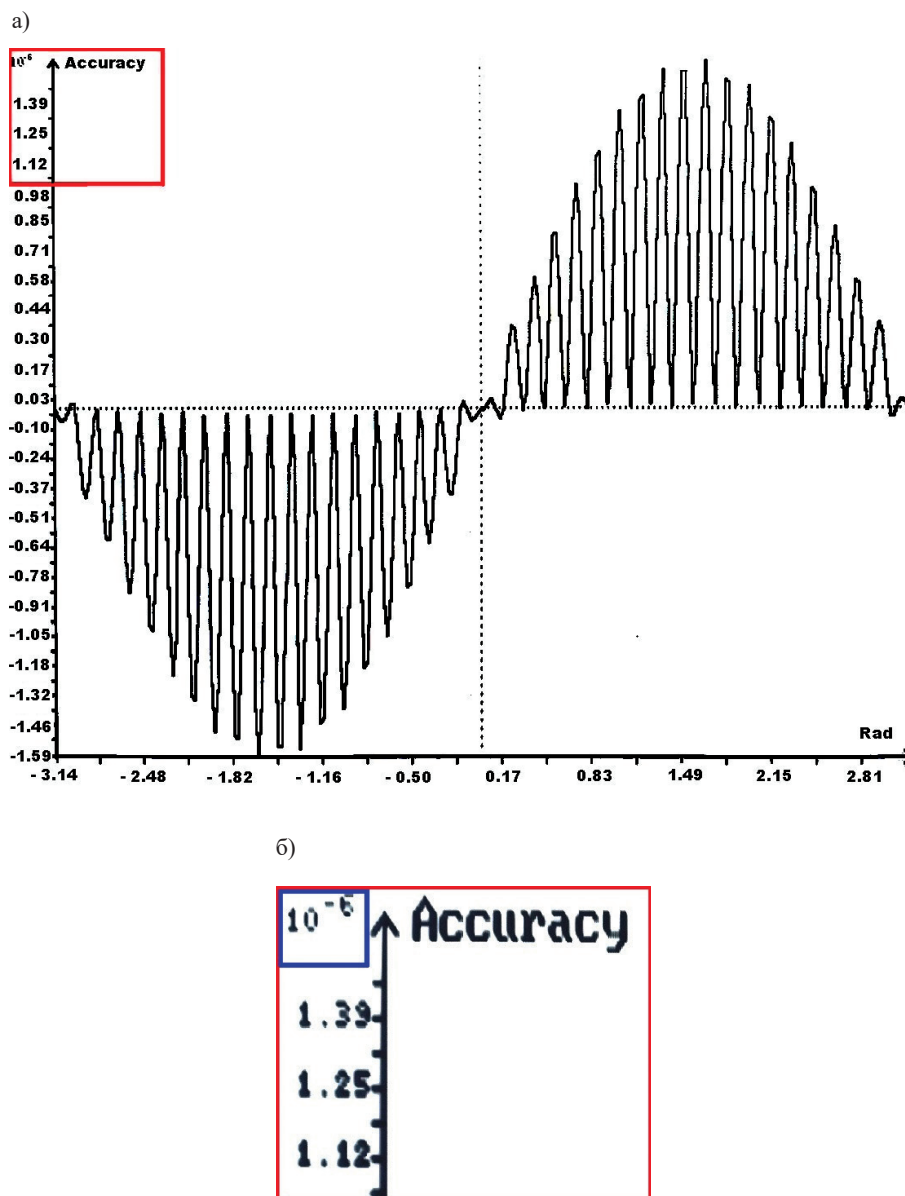


Рис. 3. Априорная оценка точности интерполяции синусоидной функции:
а — общий график оценки точности;
б — фрагмент фактического значения погрешности
в увеличенном формате

По оси абсцисс графика отложены значения аргумента в радианах на интервале $[-\pi; +\pi]$. По оси ординат фиксируются величины погрешности интерполяции. Поскольку математически синусоида имеет периодический характер и монотонную кривизну в своей области определения, виртуальный граничный контур графика оценки точности монотонно синхронизируется с периодической кривизной синуса при демонстрации минимальных значений погрешности от $0,03 \times 10^{-6}$ на начальном линейном участке графика до наибольшего значения $1,59 \times 10^{-6}$ в точке максимума синусоиды. В процессе анализа рис. 3, а необходимо обратить внимание на факт оп-

тимальности сплайн-интерполяции: в каждом из 40 узлов в сегменте $[-\pi; +\pi]$ погрешность многократно равна нулю вследствие алгоритмического условия совпадения значений интерполируемой навигационной функции со значениями сплайна в узлах сетки. Погрешность в любой произвольной точке аргумента каждый раз рассчитывалась как арифметическая разница между функциональным значением архитектурно встроенного в язык Турбо Паскаль стандартного синуса и интерполированного методом сплайн-функций значения синуса в той же точке аргумента. Выполнив полный анализ графика оценки точности (см. рис. 3, а), можно прийти к подтверждению теоретического постулата об обязательности совпадения характеристик погрешностей сплайн-интерполяции с тригонометрической «гладкостью» самой интерполируемой линией, что полностью согласуется с *теоремой Вейерштрасса* [12].

На основании выполненного в работе геометрического анализа выдвинута гипотеза о фактическом совпадении числовых значений скалярных сплайновых коэффициентов c_i со значениями измерений мгновенной навигационной функции f_i . В связи с этим появилась оригинальная идея отождествить при разработке сплайнового метода разнородные по алгоритмическому назначению величины одной композитной формулой: $c_i = f_i$ [13]. Перестановка множителей c_i с дискретными значениями навигационных параметров f_i фактически позволяет по-новому осмыслить физическую суть кусочной аппроксимации.

Скриншот самой цифровой оценки точности (см. рис. 3, б) является визуализацией оси ординат в районе выделенного красного прямоугольника на общем графике погрешности сплайн-интерполяции синуса (см. рис. 3, а). Значение финальной точности виртуальным образом фрагментировано по периметру красного прямоугольника из общего графика погрешности (см. рис. 3, б) с соблюдением принципа увеличительного стекла с целью демонстрации порядка интерполяционной погрешности 10^{-6} (синий прямоугольник). При оценки точности сплайн-интерполяции (см. рис. 3, а) необходимо иметь в виду, что для каждой цифровой компоненты по оси ординат необходимо производить операцию умножения на 10^{-6} .

С использованием средств компьютерной графики представлена геометрическая интерпретация решения задачи определения места судна в рамках концептуальности проекта LORAN на примере пересечения двух гипербол. Графическая копия с экрана компьютера (рис. 4) является результатом расширенной функциональности разработанного пакета прикладных программ. Выполнено синтезирование двух абстрактных изолиний на основе метода полиномиальной сплайн-интерполяции в локальной системе координат [8].

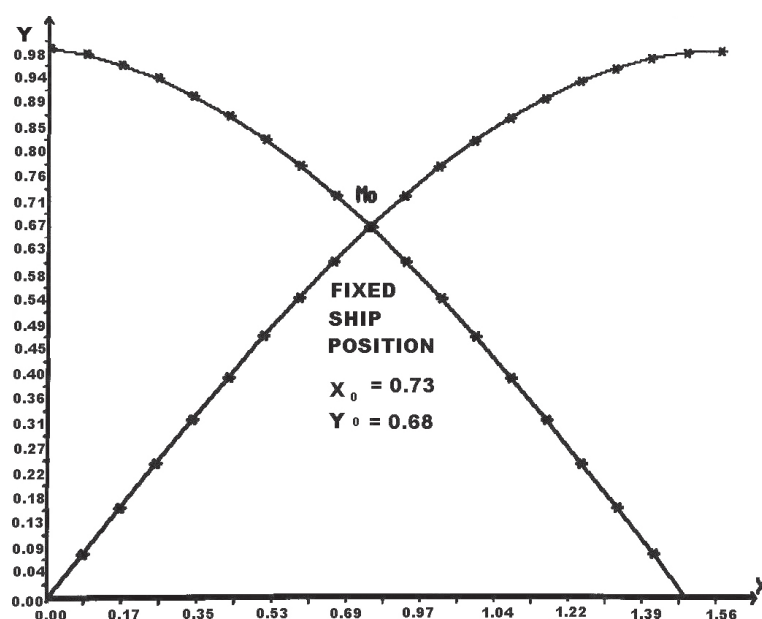


Рис. 4. Геометрическая интерпретация гипотетического определения вероятнейшего места судна

На скриншоте (см. рис. 4) демонстрируется результат расчета обсервованных координат как итерационный поиск геометрической точки пересечения гипербол на основе применения ретроспективного метода наименьших квадратов [12]. В каждой последующей итерации первые расчетные обсервованные координаты принимаются повторно за счислимые и, таким образом, вычисляется уточненное местоположение (M_o) судна при каждом повторении итерационного цикла до момента обеспечения наперед заданной степени точности в соответствии со стандартами безопасности судовождения. Финальная точность обсервации напрямую зависит от количества итераций. Для стандартных навигационных задач в общем случае достаточно применить две-три итерации.

Таким образом, судоводитель получает визуальный конечный результат на дисплее бортового компьютера при фактическом абстрагировании от необходимости графической интерполяции для определения позиции судна при наглядной компьютеризированной визуализации определения точки пересечения гиперболических изолиний или в цифровом выражении вероятнейших координат местоположения судна. Декларируемая точность эксперимента сплайновой интерполяции может быть сопоставлена с количественными оценками других существующих методов определения координат для выражения оценочного мнения при исследовании вопроса самостоятельного интереса сравнения эффективности обработки навигационной информации.

Дополнительным преимуществом предложенного алгоритма является предельная универсальность методов сплайн-функций для многообразия решения навигационных задач [8], [11], [12]. Исследование вопроса навигационного использования e-LORAN в модификации с методами сплайн-функций является частным приложением общего теоретического подхода к решению задач судовождения с позиций теории приближения функций. Под универсальностью подразумевается независимость алгоритма от конкретного геометрического представления интерполируемой изолинии. Математический формат изолинии определяется объемом памяти бортового компьютера с сохраненными предварительно рассчитанными сплайновыми коэффициентами и сеточными параметрами для вычисления с высоким быстродействием значения навигационной функции в любой точке аргумента по номеру сеточного интервала [9].

Обсуждение (Discussion)

В практике современного мореплавания можно привести примеры, когда по разным техническим причинам GPS оказывалась локально недееспособной, что подтверждает концепцию необходимости дублирования спутниковой системы альтернативным методом, основанным на других принципах работы [14]. Пример политического противостояния Южной Кореи и КНДР в вопросе безопасности судовождения практически выражается в критической необходимости для южнокорейских моряков периодически возвращать суда к причалам вследствие региональной блокировки сигналов GPS [15], [16]. Правительство Южной Кореи вынуждено будет отказаться от GPS при возможном переходе на альтернативную систему «наземной» радионавигации. Предполагается, что в ближайшем будущем будет реализовано перепрофилирование на e-LORAN в Азиатско-Тихоокеанском регионе [17]. Планируемая точность системы e-LORAN на Корейском полуострове минимально должна составить 20 м [18], но при дополнении концепции e-LORAN алгоритмом мультицепей, согласно данным проведенных научных экспериментов [19], точность может составить 15,32 м. Стимулирующую точность целесообразно признать высоким потенциалом морской навигационной службы в Северо-Восточной Азии.

Следует отметить, что правительство США официально оставляет за собой право в случае военных конфликтов применить так называемый *режим селективного доступа* для гражданских и военных потребителей [20]. Гражданским потребителям открытый канал GPS временно может быть технически деактивирован при сохранении исключительного доступа военным пользователям спутниковой системы. Региональное отключение GPS для подвижных объектов в случае военных конфликтов уже практиковалось в Ираке в 2007 г. [15].

В условиях современности кибернетическая атака на GPS становится реальностью [20]. Глобальная навигационная система оказывается все более подверженной намеренной помехе глушения спутникового сигнала при ускоренном техническом развитии специфичного оборудования [22]. При помощи незаконного применения специальных средств можно организовать так называемые *инновационные спуфинг-атаки*, которые искусственно вызывают искажения реальных данных Global Navigation Satellite System (GNSS) [23], [24]. Спуфинг-технология основана на модуляции псевдослучайного кода на частотах GNSS с переориентированием судового приемоиндикатора от слабого спутникового сигнала на фальсифицированный сильный сигнал [25], [26]. Так, инициативная группа научных исследователей провела уникальный научный эксперимент в Ионическом море в 2013 г. по оценке воздействия спуфинг-атаки на кибернетическую безопасность морского объекта. Суть эксперимента заключалась в установлении скрытого часового враждебного контроля над 65-метровой яхтой с фактическим перехватом управления от экипажа в руки условных хакеров при применении спуферного оборудования по псевдопозиционированию местоположения на основе транслирования замаскированной имитационной помехи [16]. Дезориентирующая подмена маршрута оказалась незамеченной для судоводителя яхты [27]. Фиктивный дрейф вахтенный помощник объяснил влиянием океанских течений. Как противодействие неожиданному сносу вахтенным помощником предпринимались безуспешные попытки корректировки движения судна при помощи многочисленных изменений курса [28].

Сообщение о массовом случае спуфинга в Черном море поступило в адрес Береговой охраны США 22 июня 2017 г. более чем от двадцати судов у побережья Новороссийска [5]. Согласно мотивированному сообщению капитана одного из двадцати судов, приемоиндикатор 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 [21]. При этом автоматический приемоиндикатор фиксировал безопасную точность в пределах 100 м при индикации высоты судовой антенны 39 м под водой. Самотестирование спутниковой аппаратуры проходило успешно, но это не меняло фактической ситуации. Ситуация некорректности работы GNSS в Черном море является очевидным доказательством современной реальности массового спуфинга [25]. Морской администрацией США в качестве объяснения инцидента было сделано предположение о возможных испытаниях модернизированной наземной системы российского аналога LORAN под названием «Чайка» в комбинации с Глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС). Система позиционирования ГЛОНАСС ориентирована в основном на российского потребителя и не является мировым лидером по продажам приемоиндикаторов в мировом масштабе как GPS. Проблемы GPS остаются нерешенными несмотря на невозможность влияния правительства США на вопросы эксплуатации ГЛОНАСС и других формирующих концепцию e-Navigation систем глобального позиционирования, а именно: европейского «Галилео», китайской системы «Компас», японской квазизенитной спутниковой системы, индийской региональной навигационной спутниковой системы (ИРНСС).

Поиск противодействия кибернетическим атакам в виде гипотез, алгоритмов или технических устройств в настоящее время признается актуальным, но пока еще вопросы практической реализации антиспуфинговых средств находятся в стадии исследования [29]. Защита морского потребителя от замаскированных искажений сигналов GPS является серьезной проблемой безопасности будущего навигации при инновационных методах идентификации хакерского воздействия, ориентированного на фальсификацию целевой задачи безопасного следования по запланированному маршруту любого морского подвижного объекта.

Проанализированные разрозненные факты подтверждают общую идею необходимости дублирования Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) альтернативной системой навигации e-LORAN. При параллельном с ГНСС использовании e-LORAN в качестве резервного оборудования ситуация потери контроля над управлением любого судна исключается в принципе. В этой связи особую значимость приобретают методы эффективной обработки навигационной информации в новых концептуальных морских приложениях.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование автоматизации обработки навигационной информации в структуре системы e-LORAN позволяет сделать следующие выводы:

1. Для создания прогрессивных алгоритмов интерполяции гиперболической изолинии в долгосрочной перспективе следует отдать предпочтение эффективной вычислительной композиции на основе сплайнов.

2. На основе авторского методического и алгоритмического обеспечения сплайновой интерполяции гиперболы как изолинии системы e-LORAN составлены две Паскаль-программы, обеспечивающие высокую точность и устойчивость вычислительных процедур.

3. В качестве прикладного программного обеспечения для бортового компьютера синхронно апробировано два альтернативных варианта решения поставленных задач: полиномиальная сплайн-интерполяция и финитная технология.

4. В тестовом эксперименте выполнена априорная оценка точности сплайн-интерполяции навигационной изолинии.

5. Доказана высокая точность сплайн-интерполяции навигационной изолинии с порядком до шестого знака после запятой любой расчетной единицы.

6. При реализации предлагаемого подхода появляется возможность отказаться от специализированных электронных или печатных типографским способом морских карт с семейством гипербол для навигационных приложений, используя сплайновое алгоритмическое и программное обеспечение в базе данных бортового компьютера.

7. При широком применении в современном судовождении дифференциального режима, обеспечивающего максимальную точность e-LORAN, предлагаемые сплайновые алгоритмы позволяют напрямую в практических приложениях использовать сетку искаженных поправками гипербол. Фиктивная изолиния имеет сложную математическую формализацию при условии принципиальной невозможности геометрического решения навигационной задачи традиционным способом. Синтез искаженных изолиний методами сплайн-интерполяции не представляет реальной математической проблемы с позиций математического аппарата кусочных аппроксимаций.

8. Разработан алгоритм в программной реализации на основе метода наименьших квадратов в новой интерпретации расчета вероятнейших координат места судна как итерационный поиск точки пересечения сплайновых гиперболических изолиний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Czaplewski K.* Global Navigation Satellite Systems — Perspectives on Development and Threats to Safety of Sea Transportation / K. Czaplewski, D. Goward // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2016. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 183–192. DOI: 10.12716/1001.10.02.01.

2. *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.

3. *Safar J.* Analysis, Modeling, and Mitigation of Cross-Rate Interference in e-Loran: Analysis of Cross-Rate Interference in eLoran / J. Safar, P. Williams, A. Grant, F. Vejrazka // *Navigation*. — 2016. — Vol. 63. — Is. 3. — Pp. 295–319. DOI: 10.1002/navi.142.

4. *Fang T. H.* GPS and eLoran Integrated Navigation for Marine Applications Using Augmented Measurement Equation Based on Range Domain / T.H. Fang, Y. Kim, S.G. Park, K. Seo, S.H. Park // *International Journal of Control Automation and Systems*. — 2020. — Vol. 18. — Is. 9. — Pp. 2349–2359. DOI: 10.1007/s12555-019-0287-y.

5. *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.

6. *Czaplewski K.* Does Poland Need eLoran? / K. Czaplewski // the 18th International Conference on Transport System Telematics. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 525–544. DOI: 10.1007/978-3-319-97955-7_35.

7. *Roth G. L.* New Loran Capabilities Enhance Performance of Hybridized GPS/LORAN Receivers / G. L. Roth, P.W. Schick // *Navigation*. — 1999. — Vol. 46. — Is. 4. — Pp. 249–260. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1999.tb02412.x.

8. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
9. Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
10. Loran-C User Handbook. — Washington: USCG, 1992. — 241 p.
11. Ююкин И. В. Аппроксимация геоида методами сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
12. 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.
13. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
14. Song S. P. The Integrated eLoran/GPS Navigation Algorithm for Reduced Computational Complexity and High Accuracy / S. P. Song, M. Y. Shin, S. B. Son, Y. B. Kim, S. J. Lee, C. S. Park // The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. — 2011. — Vol. 60. — Is. 3. — Pp. 612–619. DOI: 10.5370/KIEE.2011.60.3.612.
15. Czaplewski K. The Identification of Possible Applications of the E-Loran System / K. Czaplewski, A. Weintrit // Annual of Navigation. — 2018. — Vol. 25. — Is. 1. — Pp. 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
16. 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.
17. Fang T. H. Integrated GPS, INS, and eLoran for Maritime Tasks Using ASF Correction by Kalman Filter / T. H. Fang, Y. Kim, D. K. Kim, S. Lee, K.-Y. Seo, S.H. Park // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. — 2018. — Vol. 24. — Pp. 742–749. DOI: 10.5302/JICROS.2018.0079.
18. Son P. W. Preliminary study of the re-radiation effect of Loran signal to improve the positioning accuracy / P. W. Son, S. G. Park, K. Seo, S. Park, T. H. Fang // 2019 European Navigational Conference (ENC). — IEEE, 2019. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/EURONAV.2019.8714156.
19. Son P. W. Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation / P.W. Son, J. H. Rhee, J. Seo // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System. — 2017. — Vol. 54. — Is. 2. — Pp. 666–679. DOI: 10.1109/TAES.2017.2762438.
20. Mina T. Y. GPS spoofing detection for the power grid network using a multireceiver hierarchical framework architecture / T. Y. Mina, S. Bhamidipati, G. X. Gao // Navigation. — 2019. — Vol. 66. — Is 4. — Pp. 857–875. DOI: 10.1002/navi.341.
21. Falco G. Cybersecurity Principles for Space Systems / G. Falco // Journal of Aerospace Information Systems. — 2019. — Vol. 16. — Is. 2. — Pp. 61–70. DOI: 10.2514/1.1010693.
22. Czaplewski K. Improvement in accuracy of determining a vessel's position with the use of neural networks and robust m-estimation / K. Czaplewski, M. Waz // Polish Maritime Research. — 2017. — Vol. 24. — № 1. — Pp. 22–31. DOI: 10.1515/pomr-2017-0003.
23. Kerns A. J. Unmanned Aircraft Capture and Control Via GPS Spoofing / A.J. Kerns, D.P. Shepard, J.A. Bhatti, T.E. Humphreys // Journal of Field Robotics. — 2014. — Vol. 31. — Is. 4. — Pp. 617–636. DOI: 10.1002/rob.21513.
24. Psiaki M. L. GNSS spoofing and detection / M.L. Psiaki, T.E. Humphreys // Proceedings of the IEEE. — 2016. — Vol. 104. — Is. 6. — Pp. 1258–1270. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2526658.
25. 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.
26. Hu Y. Spoofing Detection Technique Using Fraction Parts of Double-difference Carrier phases / Y. Hu, S. Bian, B. Ji, J. Li // The Journal of Navigation. — 2018. — Vol. 71. — Is. 5. — Pp. 1111–1129. DOI: 10.1017/S0373463318000206.
27. Kugler L. Why GPS Spoofing is a Threat to Companies, Countries / L. Kugler // Communications of the ACM. — 2017. — Vol. 60. — No. 9. — Pp. 18–19. DOI: 10.1145/3121436.

28. Bhatti J. Hostile Control of Ships via False GPS Signals: Demonstration and Detection / J. Bhatti, T. E. Humphreys // *Navigation*. — 2017. — Vol. 64. — Is. 1. — Pp. 51–66. DOI: 10.1002/navi.183.
29. Borio D. A sum-of-squares approach to GNSS spoofing detection / D. Borio, C. Gioia // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*. — 2016. — Vol. 52. — Is. 4. — Pp. 1756–1768. DOI: 10.1109/TAES.2016.150148.

REFERENCES

1. Czaplewski, Krzysztof, and Dana Goward. "Global Navigation Satellite Systems — Perspectives on Development and Threats to System Operation." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.2 (2016): 183–192. DOI: 10.12716/1001.10.02.01.
2. 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.
3. Safar, Jan, Paul Williams, Alan Grant, and Frantisek Vejrazka. "Analysis, Modeling, and Mitigation of Cross-Rate Interference in e-Loran: Analysis of Cross-Rate Interference in eLoran." *Navigation* 63.3 (2016): 295–319. DOI:10.1002/navi.142.
4. Fang, Tae Hyun, Youngki Kim, Sul Gee Park, Kiyol Seo, and Sang Hyum Park. "GPS and eLoran Integrated Navigation for Marine Applications Using Augmented Measurement Equation Based on Range Domain." *International Journal of Control Automation and Systems* 18.9 (2020): 2349–2359. DOI: 10.1007/s12555-019-0287-y.
5. 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.
6. Czaplewski, Krzysztof. "Does Poland Need eLoran?" *the 18th International Conference on Transport System Telematics*. Springer, Cham, 2018. 525–544. DOI: 10.1007/978-3-319-97955-7_35.
7. Roth, G. Linn, and Paul W. Schick. "New Loran capabilities enhance performance of hybridized GPS/Loran receivers." *Navigation* 46.4 (1999): 249–260. DOI: 10.1002/j.2161-4296.1999.tb02412.x.
8. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
9. Yuyukin, Igor V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
10. *Loran-C User Handbook*. Washington: USCG, 1992.
11. Yuyukin, Igor V. "Geoid approximation by methods of spline functions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
12. 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.
13. Yuyukin, Igor V. "Interpolation of navigational function by lagrange type spline." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
14. Song, Se-Phil, Mi-Young Shin, Seok-Bo Son, Young-Baek Kim, Sang-Jeong Lee, and Chan-Sik Park. "The Integrated eLoran/GPS Navigation Algorithm for Reduced Computational Complexity and High Accuracy." *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers* 60.3 (2011): 612–619. DOI: 10.5370/KIEE.2011.60.3.612.
15. Czaplewski, Krzysztof, and Adam Weintrit. "The Identification of Possible Applications of the E-Loran System." *Annual of Navigation* 25.1 (2018): 165–186. DOI: 10.1515/aon-2018-0012.
16. 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.
17. 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 (2018): 742–749. DOI: 10.5302/J.ICROS.2018.0079.
18. Son, Pyo-Woong, Sul Gee Park, Kiyeol Seo, Sanghyun Park, and Tae Hyun Fang. "Preliminary study of the re-radiation effect of Loran signal to improve the positioning accuracy." *2019 European Navigational Conference (ENC)*. IEEE, 2019. 1–4. DOI: 10.1109/EURONAV.2019.8714156.

19. Son, Pyo-Woong, Joon Hyo Rhee, and Jiwon Seo. "Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* 54.2 (2017): 666–679. DOI: 10.1109/TAES.2017.2762438.

20. Mina, Tara Yasmin, Sriramya Bhamidipati, and Grace Xingxin Gao. "GPS spoofing detection for the power grid network using a multireceiver hierarchical framework architecture." *Navigation* 66.4 (2019): 857–875. DOI: 10.1002/navi.341.

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

22. Czaplewski, Krzysztof, and Mariusz Waz. "Improvement in accuracy of determining a vessel's position with the use of neural networks and robust m-estimation." *Polish Maritime Research* 24.1 (2017): 22–31. DOI: 10.1515/pomr-2017-0003.

23. Kerns, Andrew J., Daniel P. Shepard, Jahshan A. Bhatti, and Todd E. Humphreys. "Unmanned Aircraft Capture and Control Via GPS Spoofing." *Journal of Field Robotics* 31.4 (2014): 617–636. DOI: 10.1002/rob.21513.

24. Psiaki, Mark L., and Todd E. Humphreys. "GNSS spoofing and detection." *Proceedings of the IEEE* 104.6 (2016): 1258–1270. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2526658.

25. 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.

26. Hu, Yanfeng, Shaofeng Bian, Bing Ji, and Juan Li. "Spoofing Detection Technique Using Fraction Parts of Double-difference Carrier phases." *The Journal of Navigation* 71.5 (2018): 1111–1129. DOI: 10.1017/S0373463318000206.

27. Kugler, Logan. "Why GPS Spoofing is a Threat to Companies, Countries." *Communications of the ACM* 60.9 (2017): 18–19. DOI: 10.1145/3121436.

28. Bhatti, Jahshan, and Todd E. Humphreys. "Hostile Control of Ships via False GPS Signals: Demonstration and Detection." *Navigation* 64.1 (2017): 51–66. DOI: 10.1002/navi.183.

29. Borio, Daniele, and Ciro Gioia. "A sum-of-squares approach to GNSS spoofing detection." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* 52.4 (2016): 1756–1768. DOI: 10.1109/TAES.2016.150148.

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: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@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: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 июля 2020 г.

Received: July 17, 2020.