

Научная статья

УДК 629.123/629.124

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.60.2.018>

Мультиагентная сеть управления группой автономных морских подвижных объектов

М.Н. Лютикова¹ mnlyutikova@mail.ru

¹Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы построения системы мультиагентной сети автономного судовождения в порту Новороссийск. В исследовании решается задача безэкипажного судовождения и буксирного обеспечения в порту на основе мультиагентного подхода. В статье описывается система, состоящая из интеллектуального агента (швартуемое судно), группы смышлёных агентов, которыми являются статические навигационные точки, привязанные к причалу и существующим маякам и действительно интеллектуальных агентов – это буксиры-автоматы, которые имеют интеллектуальную управляющую систему. В состав интеллектуальной управляющей системы входят: сервер, инерциальная навигационная система, система спутниковой навигации и лазерная дальномерная система, обеспечивающая точное позиционирование каждого из буксиров относительно интеллектуального агента. Мультиагентная сеть решает задачу позиции каждого из участвующих в процессе автономного судовождения агентов (смышлёных, интеллектуальных, действительно интеллектуальных) по критериям минимума ошибок определения расстояний с триангуляцией по координатам спутниковой навигационной системы, с уточнением по счислениям лазерной дальномерной системы действительно интеллектуальных агентов. Учёт расстояний сближения между агентами и прохождение по заранее рассчитанной траектории производится в непрерывном режиме с коррекцией команд управления автономной навигационной системой. Критериями триангуляции принят алгоритм триангуляция Делоне, с проверкой соответствия противолежащих углов смежных треугольников. Целью исследования является разработка мультиагентной сети управления группой автономных морских подвижных объектов, которая определяет позиции других агентов относительно стационарных точек с использованием триангуляции Делоне в системе полярных координат.

Ключевые слова: автономное судовождение, буксиры-автоматы, мультиагентная сеть, триангуляция Делоне, смышлёный агент, интеллектуальный агент, действительно интеллектуальный агент.

Для цитирования: Лютикова М.Н. Мультиагентная сеть управления группой автономных морских подвижных объектов. Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 2 часть 1, С. 144—154. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.018

Original article

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.60.2.018>

Multi-Agent Autonomous Group Management Network offshore mobile facilities

Marina N. Lyutikova¹ e-mail mnlyutikova@mail.ru

¹Admiral Ushakov Maritime State University

Abstract. In the paper deals with the issues of building a multi-agent network of autonomous navigation in the port of Novorossiysk. A group of intelligent agents are static navigation points tied to the tip of the berths and existing lighthouses. By an intelligent agent we mean a moored vessel, controlled in the traditional way, on which there is a crew. Truly intelligent agents we consider automatic tugs that have a control system that includes a server, an inertial navigation system, a satellite navigation system and a laser ranging system that provides accurate positioning of each of the tugs relative to the intelligent agent. The autonomous navigation system considers the positions of each of the agents participating in the process of autonomous navigation (smart, intelligent, really intelligent) according to the criteria for the minimum errors in determining distances according to the calculated coordinates of the satellite navigation system, with refinement according to the reckoning of the laser ranging system of truly intelligent agents. Accounting for approach distances between agents, passing along a pre-calculated trajectory is carried out in a continuous mode with correction of commands to control the autonomous navigation system. Triangulation criteria adopted Delaunay triangulation, with checking the correspondence of opposite angles of adjacent triangles. Operational control of a multi-agent system occurs in a local polar coordinate system built on a network of intelligent agents.

The aim of the study is to develop a methodology for a multi-agent control network for a group of autonomous marine mobile objects, which determines the positions of other agents relative to stationary points using Delaunay triangulation in the polar coordinate system.

Keywords: autonomous navigation, automatic tugboats, multi-agent network, delaunay triangulation, smart agent, Intelligent agent, truly intelligent agent

For citation: Marina N. Lyutikova, Multi-Agent Autonomous Group Management Network offshore mobile facilities, Marine intellectual technologies. 2023. № 2 part 1, P. 144—154. DOI: 10.37220/MIT.2023.60.2.018

Введение

Мультиагентные системы применяются в разных областях, включая разработку автоматизированных систем управления, автоматическую подстройку нейронных сетей распознавания, роение, распределенные сенсорные сети, управление перегрузкой в сетях связи, взаимодействие групп БПЛА, относительное выравнивание групп спутников, управление движением автономных морских подвижных объектов [1].

Пилотный проект автономного судовождения на судах коммерческого флота определен в государственной технологической программе Маринет. Интеллектуальный подход в системе управления морским транспортом - одно из основных направлений Маринета. Экспериментальные условия с безэкипажными буксирами в пилотном проекте автономного судовождения создаются в порту Новороссийск. Первые безэкипажные буксиры, планируется запустить в Новороссийске в 2026 году. Анализ работ показал, что многие авторы в своих научных трудах считают, что автономное судовождение поможет уменьшить количество аварий на море [2-3].

1. Материалы и методы

Мультиагентная сеть представляет собой состав из 9 агентов, которые на рисунке 1 отмечены как $A_1, A_2 \dots A_9$. Каждый из агентов имеет свою навигационную точку, которая является стационарной. Каждый из агентов в паре с любым другим агентом строит измерительную базу, на

рисунке она обозначена как $MB_1, MB_2 \dots MB_3$. Правила построения баз — это выбор агента и определение расстояния между ними, как показано на рисунке 1, база между агентами A_1 и A_9 обозначается как MB_{19} , а база между агентами A_4 и A_9 , соответственно MB_{49} .

База – это прямая линия между парой агентов, и длина базы определяется расстоянием между навигационными точками. Построенная мультиагентная сеть представляет собой комбинацию «смышлёных» агентов. Каждый смышлёный агент должен построить измерительную базу оценки расстояний до подвижного объекта, который в дальнейшем будем называть «интеллектуальным» агентов под управлением судоводителем и «действительно интеллектуальным» (ДИА) агентом – судном – автоматом [4].

Основа принятия решения – построения базы между агентами является соглашение, по которому наблюдаемый между «смышлёными» агентами, агент «интеллектуальный», под которым принимается судно, активно управляемое судоводителем, должен находиться внутри треугольника, образованного базой между агентами и направлениями (углами) на этот интеллектуальный агент. Лучшим решением «смышлёных» агентов считается значение наблюдаемых углов меньше 90° . Если угол зрения со «смышлёного» агента превышает величину 90° , то необходим выбор другого агента чтобы выполнялось условие соответствия базы и направлений [5].



Рис. 1. Мультиагентная сеть в порту Новороссийск, построенная по системе агента A_1

Аналогичные правила, применяемые к интеллектуальным агентам, должны быть справедливы и к агентам «действительно интеллектуальным» [5].

«Действительно интеллектуальными» агентами считаем суда-автоматы, для рассматриваемой ситуации - это четыре автономных буксира.

В отличие от других типов агентов «действительно интеллектуальные» сами должны выбирать базу

триангуляции, с «интеллектуальными» агентами за счёт применения лазерной дальномерной системы на борту буксира-автомата, комплексированной с его спутниковой системой навигации на борту. Это вызвано необходимостью управления процессом швартовки с использованием буксиров автоматов. Таким образом, позиция действительно интеллектуального агента относительно швартуемого интеллектуального агента определяется необходимостью его перемещения и вращения при операциях швартовки [7-10; 12].

2. Взаимодействие системы агентов

Построенная база «смышлёных» агентов соответствует фактическому расстоянию между навигационными точками, который могут определяться с высокой точностью. Точка нахождения интеллектуального агента определяется с двух точек, путём определения угла на объект и преобразования по теореме синусов, как показано на рисунке 2 [11-13]:

$$b = \frac{c}{\sin\gamma} \cdot \sin\beta; a = \frac{c}{\sin\gamma} \cdot \sin\alpha$$

(1) где *c* – измерительная база между «смышлёнными» агентами, *a*, *b* – расстояние с навигационных точек до «интеллектуального» агента «С».

Каждая из пар составленная «смышлёными» агентами позволяет в каждый момент времени определить курс и скорость движения «интеллектуального» агента относительно измерительной базы с высокой точностью.

Выбор «рабочей» системы «смышлённых» агентов происходит по каждой паре исходя из выбора углов $0^{\circ} \leq \alpha \leq 90^{\circ}$, $0^{\circ} \leq \beta \leq 90^{\circ}$, а *a*, *b* ≤ 10*c*, рисунок 2.

Для нашей задачи данные точек триангуляции, полученные с приёмников спутниковой навигации необходимо пересчитывать в полярные координаты

Координаты навигационных точек «смышлённых» агентов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Навигационные координаты «смышлённых» агентов радианах выдаваемые со спутникового навигационного приёмника

Обозначение	Наименование	Широта	Долгота
A1	Морвокзал	44.72257 с.ш.	37.78615 в.д.
A2	Маяк «западный мол»	44.72303 с.ш.	37.79656 в.д.
A3	Маяк «восточный мол»	44.72202 с.ш.	3780107 в.д.
A4	Оградительный мол СРЗ	44.71819 с.ш.	37.80579 в.д.
A5	Комбинат «Стройкомплект»	44.72195 с.ш.	37.82146 в.д.
A6	НВМБ створ левый	44.71606 с.ш.	37.82035 в.д.
A7	НВМБ створ правый	44.71481 с.ш.	37.82282 в.д.
A8	Транснефть пирс	44.7096 с.ш.	37.83739 в.д.
A9	Транснефть «Эстакада»	44.70148 с.ш.	37.83508 в.д.

Хорошим условием триангуляции считается равенство всех сторон треугольника, при этом на практике стараются не использовать углы меньше 5°. Исходя из рассмотренного примера применение использование базы А5-А7 желательнее на дистанции 200-1000 м. По условиям Новороссийской бухты эта дистанция соответствует приблизительно от крайней точки судоходного фарватера до створа А5-А7, далее уже непосредственно к причалам завода «Стройдеталь» необходимо использовать базу

местной системы координат относительно баз смышлёных агентов, позволяющие однозначно определять размещение интеллектуального агента относительно причала [13; 15].

Например, расчётная база между смышлёными агентами А5 и А7 составит в пересчёте в метрах

$$A5 (44.72195 \text{ с. ш. } 37.82146 \text{ в. д.}) = 44^{\circ}43'19'' \text{ с. ш. }, 37^{\circ}49'17'' \text{ в. д.}$$

$$A7 (44.71481 \text{ с. ш. } 37.82282 \text{ в. д.}) = 44^{\circ}42'53'' \text{ с. ш. }, 37^{\circ}49'22'' \text{ в. д.}$$

$$S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = 490.35 \text{ м.}$$

А расчётная база между смышлёными агентами А4 и А9 составит в метрах

$$A4 (44.71819 \text{ с. ш. } 37.80579 \text{ в. д.}) = 44^{\circ}43'06'' \text{ с. ш. }, 37^{\circ}48'21'' \text{ в. д.}$$

$$A9 (44.70149 \text{ с. ш. } 37.83508 \text{ в. д.}) = 44^{\circ}42'05'' \text{ с. ш. }, 37^{\circ}50'06'' \text{ в. д.}$$

$$S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = 3315.54 \text{ м.}$$

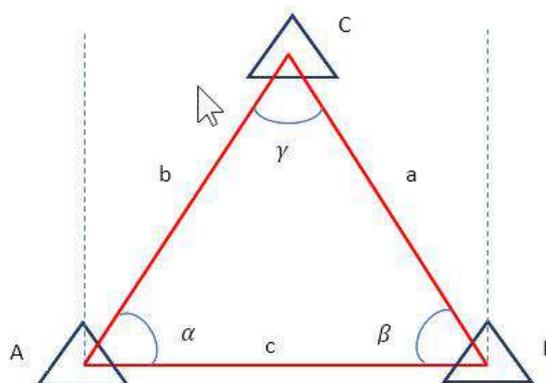


Рис. 2. Реализация сопряжённого наблюдения с двух точек («смышлённых» агентов А, В) за «интеллектуальным» агентом «С»

смышлёных агентов А6-А7. Схема мультиагентной сети представлена на рисунке 3.

Необходимо также учесть, что использование опорной базы А5-А7 применимо после подхода интеллектуального агента от базы смышлёных агентов А4-А9, рисунок 3.

Проверку соответствия критерия наилучшей триангуляции выполним по условию триангуляции Делоне.

Можно записать

$$\sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \geq 0, \quad (2)$$

где значения синусов и косинусов вычисляются через скалярные произведения векторов как

$$\cos \alpha = \frac{(x_0 - x_1)(x_0 - x_3) + (y_0 - y_1)(y_0 - y_3)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2}}; \quad (3)$$

$$\cos \beta = \frac{(x_2 - x_3)(x_2 - x_1) + (y_2 - y_3)(y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}; \quad (4)$$

$$\sin \alpha = \frac{(x_0 - x_1)(y_0 - y_3) - (x_0 - x_3)(y_0 - y_1)}{\sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} \sqrt{(x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2}}; \quad (5)$$

$$\sin \beta = \frac{(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}. \quad (6)$$

С учётом подстановки (3-6) в (2) условие Делоне [14] в виде скалярных произведений векторов запишем в виде:

$$((x_0 - x_1)(y_0 - y_3) - (x_0 - x_3)(y_0 - y_1)) \cdot ((x_2 - x_3)(x_2 - x_1) + (y_2 - y_3)(y_2 - y_1)) + ((x_0 - x_1)(x_0 - x_3) + (y_0 - y_1)(y_0 - y_3)) \cdot ((x_2 - x_3)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3)) \geq 0. \quad (7)$$

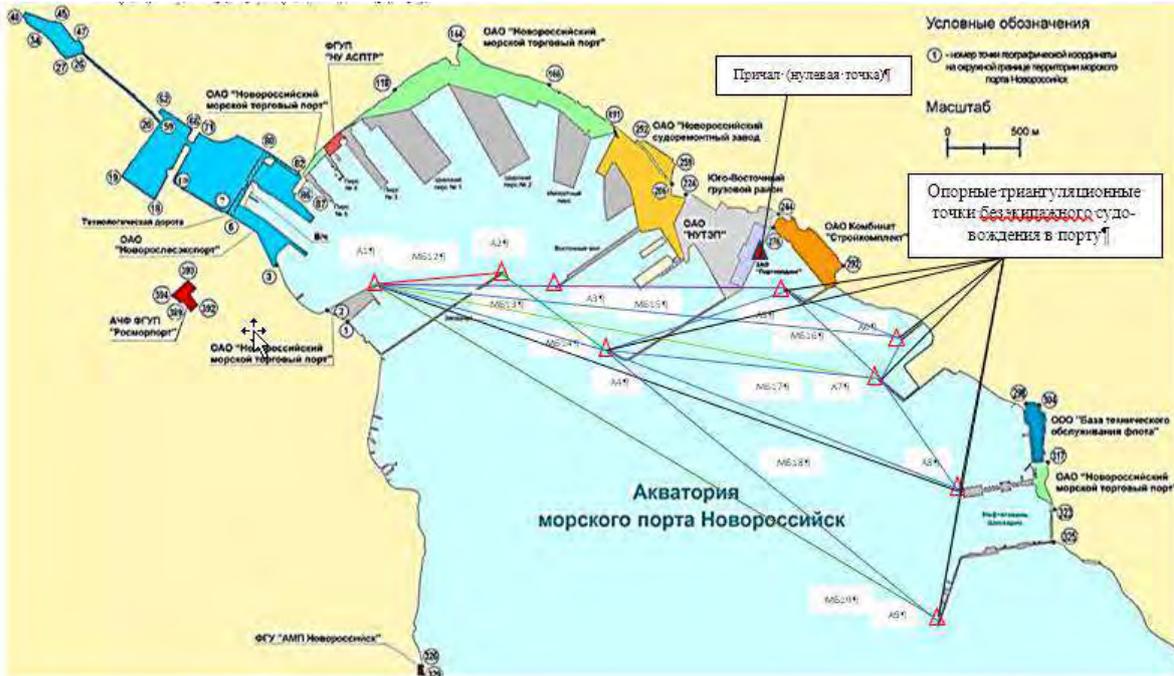


Рис. 3. Триангуляционные точки безэкипажного судоходства в Новоросси́йском порту

3. Результат взаимодействия агентов в дальней зоне

Результат взаимодействия агентов в дальней зоне считаем равной десяти базам смышлёных агентов. На таких дистанциях ошибки определения позиции агентов, сближения, взаимодействия эскорта не сказываются критически.

Позицию действительно интеллектуального агента вычислим также по алгоритму триангуляции по Делоне, как показано на рисунке 4. Соответствие противолежащих углов условию $\alpha + \beta \leq \pi$ эквивалентно условию $\sin(\alpha + \beta) \geq 0$ позволяет выполнить проверку условия Делоне для двух треугольников.

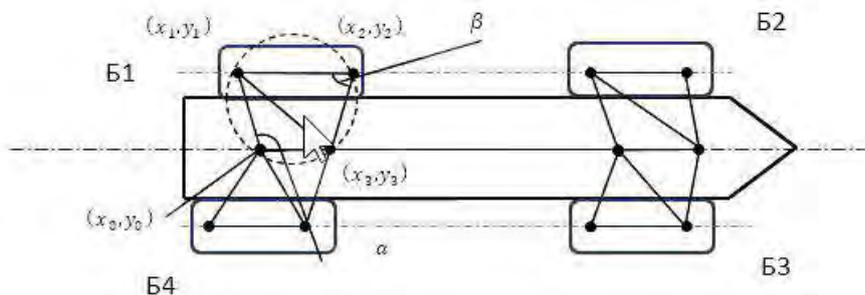


Рис. 4. Расчёт позиции вспомогательных буксиров Б1...Б4, условие Делоне (по сумме противолежащих углов) [14]

Применение малоразрядных процессоров в блоках электроники вычисления позиций агентов триангуляцией по условию Делоне потребует 10 операций умножения и 13 операций сложения и вычитания.

Учитывая, что данные поступающие с приёмников ГЛОНАСС/GPS, представляют собой также значения координат в радианах, необходим алгоритм оперативного пересчёта позиций интеллектуальных и действительно интеллектуальных агентов относительно баз

смышлёных агентов. Скажем, что критерий можно записать как

$$\begin{aligned} \Delta A_{с.ш.} &= AN_{с.ш.} - AN_{и.а.} < 0, \\ \Delta A_{в.д.} &= AN_{в.д.} - AN_{в.д.} > 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Очевидно, что критерием соответствия направлений счисления является значение разностей между координатами, в случае нахождения интеллектуального агента на фарватере разница долготы агента А5 и каждого из интеллектуальных (действительно интеллектуальных) агентов должна быть с положительным знаком, соответственно разница широты с отрицательным. То же правило распространяется на сопряжённый смышлёный агент А7.

В отношении системы местных координат А4-А9 действует тот же набор правил, если позиции взаимодействия сети интеллектуальных и действительно интеллектуальных агентов относительно смышлёных агентов находятся на схеме взаимодействия мультиагентных сетей слева и противоположные значения расчёта позиции в местных системах координат если сеть взаимодействует справа от линий баз.

Выбор более коротких баз мультиагентных сетей определяется точностью швартовки, управление базой действительно интеллектуальных агентов тогда обеспечивает вычисление более точных значений позиции на более коротких значениях баз.

В соответствие с принятым правилом в алгоритмах (2-7) значения координат смышлёных агентов выше и слева относительно положительного хода разметки морской карты и соответственно выдаваемых координат спутниковой навигационной системой определяется как $AN(x_{0с.ш.}, y_{0в.д.})$, а ниже и справа как $AN(x_{зс.ш.}, y_{зв.д.})$.

Те же правила касаются определения позиции интеллектуального агента и действительно интеллектуального агента в каждый момент времени.

Разработаем алгоритм в соответствие с определёнными выше правилами, совместное описание выглядит следующим образом:

–ввод навигационных данных (широты и долготы) со спутникового приёмника интеллектуального агента;

–вычисление дистанции и позиции интеллектуального агента относительно смышлёного агента;

–ввод навигационных данных (широты и долготы) в навигационный вычислитель каждого из действительно интеллектуальных агентов;

–вычисление дистанции и позиции интеллектуальных агентов относительно пары смышлённых агентов;

–счисление пути до интеллектуального агента по измеренным расстояниям от интеллектуального агента до каждого из действительно интеллектуальных агентов;

–движение каждого из действительно интеллектуального агентов по рассчитанной траектории подхода к интеллектуальному агенту;

–определение расстояния сближения к интеллектуальному агенту от действительно интеллектуальных агентов с использованием системы лазерного измерения расстояний;

–вычисление местных координат (расстояние и углов) и движение совместного ордера агентов к причалу;

–определение позиции совместного ордера по лазерной дальномерной системе измерения расстояний;

–изменение позиции пары действительно интеллектуальных агентов по расстояния предельного сближения к причалу;

–отшвартовка интеллектуального агента по измерения лазерной дальномерной системы и счисления расстояний в местной системе координат.

Точка швартовки есть нулевая точка счисления пути. Относительно её строится местная система координат расстояния и позиции (углы), вычисляемые базой агентов (смышлёных, интеллектуальных и действительно интеллектуальных). Нулевой точкой местной системы координат примем центр причала в районе бывшего завода «Стройдеталь», ныне терминал группы компаний «Дело» (44.724351 с.ш. 37.819153 в.д.).

Расчёт позиции смышлёных агентов производится по алгоритму фрагмент, которого показан на рисунке 5.

Преобразование координат географических в радианах к местным полярным производится последовательно, например нулевая точка причала:

– 44.724351 → 44°; 0.724351 · 60' = 43.46106 → 43'; 0.46106 · 60" = 27.6636 округление координат в разрядах секунд даёт окончательно 44°43'28" с.ш.;

– 37.819153 → 37°; 0.819153 · 60' = 49.14918 → 49'; 0.14918 · 60" = 8.9508 округление координат в разрядах секунд даёт окончательно 37°49'09" в.д.

Расстояние от нулевой точки причала до смышлёного агента

А4 (44.71819 с. ш. 37.80579 в. д.) =

44°43'06" с. ш., 37°48'21" в. д. составит $\Delta x = 37°49'09" - 37°48'21" = 48" = 0.48 \cdot 1852 = 888.96$ м;

$\Delta y = 44°43'28" - 44°43'06" = 22" = 0.22 \cdot 1852 = 407.44$ м; смышлёный агент находится относительно нулевой точки причала севернее и западнее (выше и левее на рисунке 3), тогда расстояние от нулевой точки до А4

$S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = \sqrt{888.96^2 + 407.44^2} = 977.884$ м.

Расстояние от нулевой точки причала до смышлёного агента

А7 (44.71481 с. ш. 37.82282 в. д.) =

44°42'53" с. ш., 37°49'22" в. д.; $\Delta x = 37°49'09" - 37°49'22" = -13" = -0.13 \cdot 1852 = -240.76$ м; $\Delta y = 44°43'28" - 44°42'53" = 35" = 0.35 \cdot 1852 = 648.2$ м;

как видно из расчётов смышлёный агент находится южнее нулевой точки и западнее её (ниже и левее нулевой точки на рисунке 3)

$S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = \sqrt{(-240.76)^2 + 648.2^2} = 691.468$ м.

В рассмотренном примере определена пара агентов А4-А7 даёт хорошую базу триангуляции по нулевой точке (причал). Для этого причала можно использовать полученную базу агентов как на подхвате интеллектуального агента, на фарватере, так и движение совместного ордера действительно интеллектуальных агентов и судна через линию базы

агентов (кратчайшего расстояния между агентами) непосредственно к причалу.

Если рассматривается другой причал, необходима гибкая подборка одной (или более) пары агентов, соответствующую критерию Делоне.

Дополнительно, по опыту численного моделирования, наилучшую точность удаётся

получить при равенстве базы агентов линиям точек соединения каждого из них до нулевой точки.

Алгоритм определения точки нахождения каждого из агентов в мультиагентной системе приводится на рисунке 5.

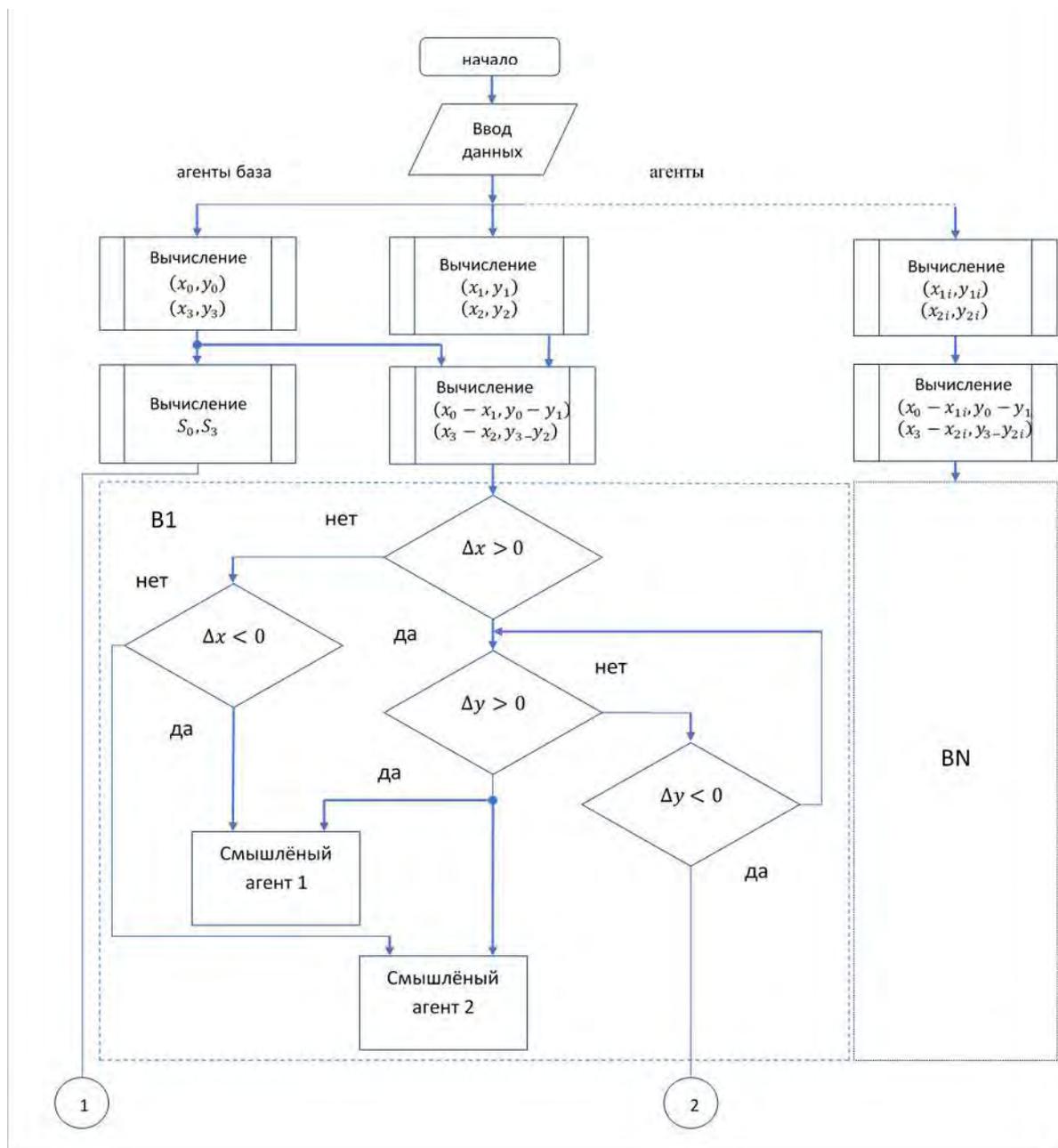


Рис. 5. Фрагмент алгоритма формирования базы смышлёных агентов, блок B1, навигационные точки блока B1 соответствуют позиции смышлёного агента справа и южнее как показано на рисунке 3

Определение смышлёный агент 1 выносятся по правилам $\Delta x < 0$ и $\Delta y < 0$ по координатам нахождения его относительно наблюдаемых конечностей интеллектуального или действительно интеллектуальных агентов, соответствующее положению южнее и западнее наблюдений.

Определение смышлёный агент 2 соответствует измеренным координатам по правилам $\Delta x > 0$ и $\Delta y < 0$, т.е. севернее и западнее наблюдений.

Блоки алгоритмов вычисления элементов мультиагентной сети при пересечении интеллектуальным или действительно интеллектуальными агентами линии базы, соответствующее положению восточнее смышлёных агентов приводится по правилам $\Delta x < 0$

и $\Delta y > 0$ и $\Delta x > 0$ и $\Delta y > 0$, т.е. восточнее, а также южнее и севернее смышлённых агентов.

Поворот базы смышлённых агентов (выбор базы новой триангуляции) происходит при углах триангуляции интеллектуальных и действительно интеллектуальных агентов, при острых углах менее 10° , и расстоянии до наблюдаемых навигационных точек более двух длин базы.

При выборе очередной базовой системы смышлённых агентов, проверяется система углов, по условию Делоне как показано на рисунке 3. Необходимо уточнение по размерениям интеллектуальных и действительно

интеллектуальных агентов, для уточнения ориентации в каждый момент времени. Учитывая, что действительно интеллектуальные агенты имеют значительно меньшую длину, уточнение позиции обеспечивается дополнительно лазерной дальномерной системой.

Результатами вычислений являются истинный курс (ИК), истинный пеленг (ИП) и курсовой угол (КУ), наблюдаемые смышлёнными агентами, а также интеллектуальными и действительно интеллектуальными агентами.

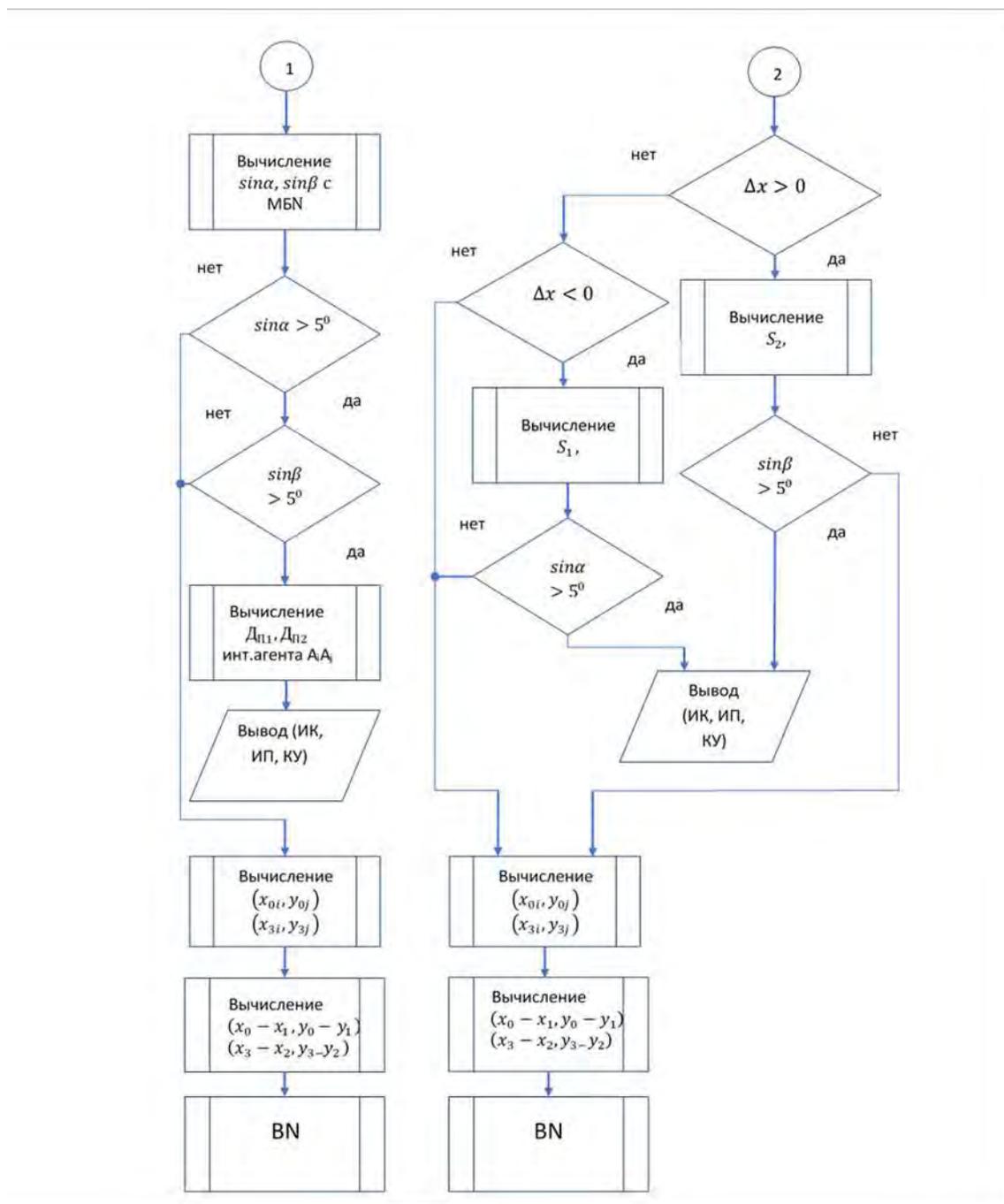


Рис. 6. Фрагмент алгоритма формирования базы смышлённых агентов, блок В1, навигационные точки блока В1 соответствуют позиции смышлённого агента справа и южнее как показано на рисунке 3 (окончание)

Программа вычисления параметров пути предусматривает определение дистанций $D_{П1}$ и $D_{П2}$ до точек, на которых расположен приёмник ГЛОНАСС/GPS в диаметральной плоскости интеллектуального (действительно интеллектуального агента).

Каждый из действительно интеллектуальных агентов обладает также лазерно-дальномерной системой позволяющей учитывать скорость и дистанцию сближения интеллектуального агента и действительно интеллектуального агента, курсовые углы определяются с точек смыслённых агентов.

Сформированные базы оценок дистанций, истинного курса, истинного пеленга и курсовых углов, совместно с измерениями лазерно-дальномерной системы действительно интеллектуальных агентов позволяют выполнять движение по задаваемой траектории, конкретно вводом точек для каждого из агентов по условиям судовождения в порту Новороссийск. В рассмотренных условиях решения задачи вычисления позиций и условий судовождения в порту приёмники сигналов спутниковой навигации должны располагаться в диаметральной плоскости каждого из судов на носовой и кормовой оконечностях.

4. Мультиагентная сеть в ближней зоне

Подход к причалу, как к конечной точке маршрута требует выполнения такой ответственной операции как швартовка. При этом вместе с постановкой судна к причалу требуется выполнить безопасное маневрирование судов эскорта.

Управление порядком швартуемого судна совместно с буксирами при подходе к причалу осуществляет лоцман с использованием лоцманского носимого комплекта.

Вычисления позиции каждого из судов производится с использованием часов спутника. Тогда приёмниками ГЛОНАСС/GPS могут производиться измерения псевдодальности, фазы и псевдоскорости на одной или двух несущих частотах.

Позиции судов относительно друг друга уточняется лазерной дальномерной системой при этом измерения псевдодальности по спутнику ρ_{ma}^i , приёмника P_α по спутнику S_m в момент времени t^i выражается следующим образом:

$$\rho_{ma}^i = R_{ma}^i + c(\tau_m^i - \tau_a^i), \quad (9)$$

где R_{ma}^i – расстояние между антеннами спутника S_m и приёмника P_α при проведении i – го измерения; τ_m^i – поправка к часам спутника S_m в момент i – го измерения, τ_a^i – поправка к часам приёмника P_α в момент i – го измерения; c – скорость света в вакууме.

Поправка к часам спутника позволяет корректировать инерциальную систему действительно интеллектуальных агентов. Фазовое измерение ϕ_{ma}^i приёмника P_α по спутнику S_m в момент времени t_a^i выражается формулой:

$$\phi_{ma}^i = f_m \cdot \left(\frac{R_{ma}^i}{c} + \tau_m^i - \tau_a^i \right) + N_{ma}, \quad (10)$$

где f_m – несущая частота излучения спутника S_m ; N_{ma} – целое число, отражающее циклическую неоднозначность фазовых измерений.

Скорость сближения интеллектуальных и действительно интеллектуальных агентов

определяется по измерениям псевдоскорости $\dot{\rho}_{ma}^i$ приёмника P_α по спутнику S_m в момент времени t^i и выражается следующим выражением:

$$\dot{\rho}_{ma}^i = \dot{R}_{ma}^i + c k_a^i \quad (11)$$

где

$$k_a^i = (f_a^i - f_{*a})/f_{*a}, \quad (12)$$

причём \dot{R}_{ma}^i – скорость изменения расстояния между антеннами спутника S_m и приёмника P_α при проведении i – го измерения; f_a^i – частота опорного генератора (ОГ) приёмника P_α в момент времени t^i ; f_{*a} – номинальная частота ОГ приёмника P_α ; k_a^i – относительное отклонение частоты ОГ приёмника P_α от номинала в момент времени t^i ; c – скорость света.

Величины R_{ma}^i и \dot{R}_{ma}^i , входящие в формулы (9-11) вычисляются в момент времени t^i по координатам и скоростям в системе координат мультиагентной сети (СКМС) фазовых центров антенн спутника S_m и приёмника P_α .

Координаты r_a^i и скорости v_a^i фазового центра антенны P_α каждого из агентов выражаются через СКМС следующим образом через параметры движения ТС в момент времени t^i :

$$r_a^i = r^i + Q^i r_a^\Delta;$$

$$v_a^i = v^i + \omega^i Q^i r_a^\Delta;$$

где r^i , v^i , Q^i , ω^i – значения параметров r, v, Q, ω движения ДИА в момент времени t^i ; $r_a^\Delta = (X_a, Y_a, Z_a)$ – вектор координат антенны P_α в СКМС.

Таким образом, измерения $\rho_{ma}^i, \phi_{ma}^i, \dot{\rho}_{ma}^i$ в момент t^i выражается через параметры движения действительно интеллектуальных агентов в тот же момент времени.

Считывание данных от лазерно-дальномерной системы ДИА совместно с измерениями псевдоскорости и псевдодальности позволяют задавать дистанцию отхода ДИА от швартуемого судна. При этом обеспечивается проверка дистанции от выбранной базы смыслённых агентов, как показано на рисунке 7.

Вычисленные точки траектории центра масс интеллектуального агента соответствуют измеренному значению относительно нулевой точки (положения центра масс ИА относительно центра причала).

Аппроксимация множества M исчисленных точек положения центра масс, взятых в фиксированные моменты времени полиномом степени N , соответствует критерию $s = s(t)$ по правилу $M \gg N+1$. Массив исчисленных данных всегда будет подгоняться по избыточному числу исчисленных данных. Ошибки приближения полинома являются разностями, поэтому ошибку счисления, которая должна укладываться в некоторую наименьшую величину.

Приближение счисления координат порядка (положения интеллектуального агента и базы действительно интеллектуальных агентов) выполним методом наименьших квадратов, при этом положение точки центра масс судна можно корректировать изменением упоров системы действительно интеллектуальных агентов.

Выбор пяти точек анализа положения центра масс обусловлено четвёртым порядком степени полинома, решение разностей пятого порядка возможно только численными методами.

Срединную точку определим нулевой два шага влево определим как «-2» и «-1» аналогично два

шага вправо «1» и «2», т.е. $s_m = m, \forall m = -2, -1, 0, 1, 2$. Приближение обеспечивается прямыми линиями $S = A + Bt$, тогда:

$$F(A, B) = \sum_{m=-2}^2 [s_m - (A + Bm)]^2. \quad (13)$$

Переменными параметрами, изменяя которые можно изменять численное и фактическое положение центра масс служат коэффициенты «А» и «В», тогда дифференцируя функцию распределения (13) по А и В, а затем приравняем нулю, для двух крайних значений $\sum s_m = 0$ и $\sum s_m^2 = 10$:

$$\begin{cases} 5A + 0B = \sum_{m=-2}^2 s_m^2, \\ 0A + 10B = \sum_{m=-2}^2 m s_m^2. \end{cases} \quad (14)$$

Система нормальных уравнений (14) даёт сглаживание методом наименьших квадратов по пяти точкам исчисленных значений траектории центра масс швартуемого судна

$$\bar{s}_m = \frac{1}{5} \sum_{m=-2}^2 s_{i-m}. \quad (15)$$

В зависимости от навигационной обстановки сглаживание траектории можно выполнить имея минимум две крайние точки, в случае ветра или волнения число точек необходимо увеличивать, и время выборки исчисленных значений уменьшать.

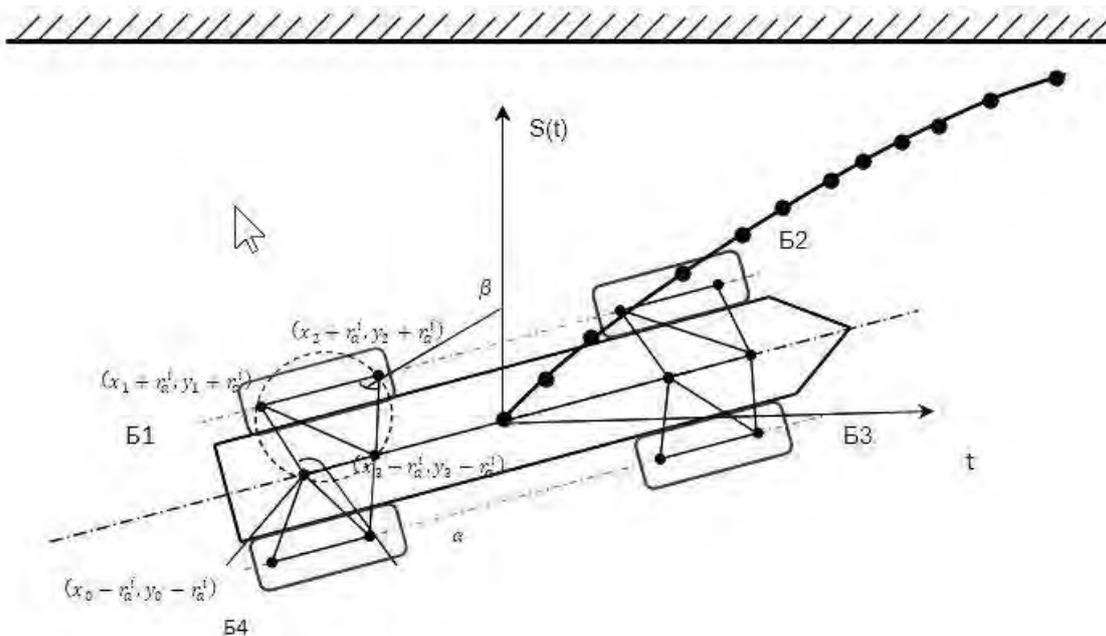


Рис. 7. Задание шага изменения координаты действительно интеллектуальных агентов на лоцманском планшете

Выводы

Результатом рассмотренной мультиагентной сети организации безэкипажного судовождения в порту Новороссийск является разработка системы формирования базы измеренных углов и дистанций смышлёных, интеллектуальных и действительно интеллектуальных агентов.

Разработанный алгоритм формирования траектории движения действительно интеллектуальных агентов по условиям судовождения в порту основан на измерениях расстояния аналитическим методом по счислениям спутниковой навигационной системы, измерения расстояния лазерной навигационной системой и проверки углов направлений по критерию Делоне. Подход к точкам определяемых с баз смышлёных агентов обеспечивается лоцманом на борту

интеллектуального агента. Формирование базы смышлёных агентов происходит в автоматическом режиме триангуляции по условию Делоне.

Уточнение позиции действительно интеллектуальных агентов обеспечивается также лазерно-дальномерной системой на каждом из действительно интеллектуальных агентов.

Корректировка пути ордера в составе интеллектуального и действительно интеллектуальных агентов происходит по положению приёмников спутниковой системы навигации ГЛОНАС/GPS размещённых в диаметральной плоскости интеллектуального агента на носовой и кормовой оконечностях судна.

Непосредственно постановку судна к причалу выполняет лоцман, использующий лоцманский носимый комплект (пульт) управления швартовкой.

Литература

1. Алексеев А. А. Конфигурация управляющего комплекса в вариации мультиагентной системы потока судов в концепции развития Е-навигации. Транспортное дело России. №. 4. 2020, 197-200 с.
2. Олейников Б. И., Костылев И. И., Коняев Д. В., Петров А. П. Особенности управления судами без экипажей. Морские интеллектуальные технологии. 2021. 220-227 с.
3. Кондратьев А. И., Худяков О. А., Попов А. Н. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России. Транспортное дело России. №. 6. 2016. 138-140 с.

4. Wang Fuok Bui, Hideki Kawai, Young Bok Kim & Kwon Song Lee. Design of the vessel mooring system with three tugs. Volume 25. Journal of Mechanical Science and Technology, article number. 2011, 1257 s.
5. J. Esposito, M. Feemster and E. Smith, Cooperative manipulation on the water using a swarm of autonomous tugboats, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, 2008, 1501–1506 s.
6. Du Z, Negenborn RR, Reppa W. Joint speed regulation of multiple vessels to control the vessel in towing scenarios. IFAC-Papers Online. T. 54, №. 16, 2021, 384-389 s.
7. Du Z, Reppa V, Negenborn RR. Joint control of autonomous tugs for towing sous-das. IFAC-PapersOnLine. T. 53. №. 2, 2020, 14470-14475 s.
8. Du Z, Negenborn RR, Reppa V. Joint multi-agent control for autonomous towing of vessels in case of environmental violations. IEEE Journal. CAA Automatica Sinica. №. 8, 2021, 1365-1379 s.
9. Zhang Y., Hearn G. E., Sen P. A multivariable neural controller for automatic ship berthing. IEEE Control Systems Magazine. T. 17, №. 4, 1997, 31 s.
10. J. P. Strand, Nonlinear position control system design for marine vessels, PhD. Thesis, Dept of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 1999.
11. K. A. Bordignon, Constrained control allocation for systems with redundant control effectors, Phd. Thesis, Dept. Aerospace & Ocean Eng., Virginia Polytechnic Institute & State Univ., Blacksburg, VA, 1996.
12. Lee, D. H., Huynh, T., Kim, Y. B., & Park, J. S. Motion Control System Design for Barge-Type Surface Ships Using Tugboats. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 2022, 1413 s.
13. Данцевич И. М. и М. Н. Лютикова. Геоинформационная лаборатория для определения объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов". Серия конференций ИОР: наука о земле и окружающей среде. Том 745. № 1. Издательство ИОР, 2021.
14. Лютикова М. Н., И. М. Данцевич и С. И. Панькина. "Интеллектуальная подводная лаборатория". Серия конференций ИОР: Наука о Земле и окружающей среде. Том 872. № 1.
15. Хекерт Е.В., Лютикова М.Н. Энергетические системы с нейтральной плавучестью для морских применений. Приложения в электронике и вычислительных системах. Конспекты лекций по электротехнике, том 971. Спрингер, Чам, 2022.
16. Скворцов, А. В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне. Вычислительные методы и программирование, 3(1), 2002, 14-39 с.
17. Лукомский Ю. А., Стариченков А. Л. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов. Гироскопия и навигация. №. 2, 1997, 44-52 с.

References

1. Alekseev A. A. Configuration of the control complex in a variation of the multi-agent system of the flow of vessels in the concept of the development of E-navigation. Transport business in Russia. №. 4. 2020, 197-200 s.
2. Oleinikov B.I., Kostylev I.I., Konyaev D.V., Petrov A.P. Features of managing ships without crews. Marine Intelligent Technologies. 2021. 220-227 s.
3. Kondratyev A.I., Khudyakov O.A., Popov A.N. On the need to introduce unmanned vessels into the Russian fleet. Transport affairs of Russia. №. 6. 2016. 138-140 p.
4. Wang Fuok Bui, Hideki Kawai, Young Bok Kim & Kwon Song Lee. Design of the vessel mooring system with three tugs. Volume 25. Journal of Mechanical Science and Technology, article number. 2011, 1257 s.
5. J. Esposito, M. Feemster and E. Smith, Cooperative manipulation on the water using a swarm of autonomous tugboats, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, 2008, 1501–1506 s.
6. Du Z, Negenborn RR, Reppa W. Joint speed regulation of multiple vessels to control the vessel in towing scenarios. IFAC-Papers Online. T. 54, №. 16, 2021, 384-389 s.
7. Du Z, Reppa V, Negenborn RR. Joint control of autonomous tugs for towing sous-das. IFAC-PapersOnLine. T. 53. №. 2, 2020, 14470-14475 s.
8. Du Z, Negenborn RR, Reppa V. Joint multi-agent control for autonomous towing of vessels in case of environmental violations. IEEE Journal. CAA Automatica Sinica. №. 8, 2021, 1365-1379 s.
9. Zhang Y., Hearn G. E., Sen P. A multivariable neural controller for automatic ship berthing. IEEE Control Systems Magazine. T. 17, №. 4, 1997, 31 s.
10. J. P. Strand, Nonlinear position control system design for marine vessels, PhD. Thesis, Dept of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 1999.
11. K. A. Bordignon, Constrained control allocation for systems with redundant control effectors, Phd. Thesis, Dept. Aerospace & Ocean Eng., Virginia Polytechnic Institute & State Univ., Blacksburg, VA, 1996.
12. Lee, D. H., Huynh, T., Kim, Y. B., & Park, J. S. Motion Control System Design for Barge-Type Surface Ships Using Tugboats. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 2022, 1413 s.
13. Dantsevich, I. M., and M. N. Lyutikova. "Geoinformation laboratory for determining objects by unmanned aerial vehicles." *IOP conference series: earth and environmental science*. Vol. 745. No. 1. IOP Publishing, 2021.
14. Lyutikova, M. N., I. M. Dantsevich, and S. I. Pankina. "The intelligent underwater laboratory." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 872. No. 1. IOP Publishing, 2021.
15. Khekert E.V., Lyutikova M.N. Neutral buoyancy power systems for marine applications. Applications in electronics and computer systems. Lectures on Electrical Engineering, Volume 971. Springer, Cham, 2022.
16. Skvortsov, A.V. Review of algorithms for constructing Delaunay triangulation. Computational Methods and Programming, 3(1), 2002, 14-39 s.
17. Lukomsky Yu. A., Starichenkov A. L. General regularities and specific features in mathematical models of marine mobile objects. Gyroscopy and Navigation. No. 2, 1997, 44-52 s.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Марина Николаевна Лютикова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и информационные технологии», ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 353924, Краснодарский край, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93., e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Marina N. Lyutikova, Ph.D. (Eng), Department of Radioelectronics and Information Technologies, Admiral Ushakov Maritime State University 353924, Krasnodar region, Novorossiysk, Lenin Avenue, 93, e-mail: mnlyutikova@mail.ru

Статья поступила в редакцию/the article was submitted 28.02.2023.

Одобрена после рецензирования/approved after reviewing 18.04.2023.

Принята к публикации/accepted for publication 26.04.2023.