

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ГРУППЫ СУДОВ

Решается задача построения кратчайших маршрутов для группы судов, получивших задание достижения условных целей с известными координатами, расположенных в ограниченном пространстве. Рассмотрен случай, когда число целей у всех судов одинаковое. Задача считается выполненной при достижении судами всех своих целей. Предлагается два алгоритма решения задачи координации действий судов с расчетом минимальных по длине маршрутов. Эффективность решения задачи по выбору маршрутов оценивается по времени ожидания судна, последним достигшего цель. Решается задача об оптимальном выборе начальных положений судов. Численный эксперимент обнаруживает экстремальные значения параметра распределения судов в предположении о равномерном их распределении по заранее выбранной прямой. Предложенные алгоритмы и выводы из их анализа могут найти применение в организации движения морского, воздушного и наземного транспорта.

Ключевые слова: маршрут, цель, алгоритм, оптимизация пути, групповое управление, транспорт.

Введение. Постановка задачи

Выбор кратчайшего маршрута для судна, летательного аппарата или наземного транспорта определяет его эффективность и экономичность. Такие задачи для отдельных судов, или в терминологии робототехники — агентов, решаются методами дискретной математики, в частности, известны алгоритмы на графах Дейкстры, Беллмана — Форда и др. [1, с. 44]. Не менее эффективны методы искусственного интеллекта на основе нейронных сетей [2], позволяющие рассчитывать меняющиеся со временем условия [3], [4] и генетические алгоритмы [5] – [7]. Более сложные задачи для группы агентов, в том числе задачи о коллективном покрытии операционных пространств, решаются с использованием вероятностных методов и координаций действий агентов на заранее выделенных подпространствах.

Новый подход к решению задачи об управлении группой роботов, основанный на идеях коллективного взаимодействия, предложенный С. Г. Капустяном и его коллегами, отражен в [7], [8]. В [9] – [11] А. И. Кобрин и его учеников разработан алгоритм выделения операционных подпространств в среде группы роботов в условии их коллективной работы. Необходимость такого разделения возникает при решении задачи покрытия территории группой роботов для разрешения коллизий и оптимизации результатов. В [12], [13] описан аппаратный комплекс мобильного исследовательского робота, созданного для изучения многоагентных кооперативных алгоритмов управления группой роботов. Возможность применения вероятностных подходов к решению поставленной задачи изучена в [14]. Проблеме разрешения конфликтных ситуаций в работе коллектива роботов посвящена работа [15]. В [16] предлагается использование асинхронного событийно-ориентированного подхода в разработке программного обеспечения роботов, отличающегося более быстрыми итерациями разработки и тестирования алгоритмов с помощью аппаратного обеспечения. Нейросетевые методы решения задачи применены в алгоритмах [17], [18]. Область применения решений подобных оптимизационных задач весьма широка — от выбора маршрутов судов [19] и мобильных роботов в системе обслуживания и военном деле [20] до трехмерных задач планирования путей подводных аппаратов при стационарных [21] – [24] и нестационарных условиях [25].

Из множества задач о планировании путей многоагентных систем рассмотрим задачу о планировании маршрутов централизованной системы с равномерным распределением количества целей по агентам. Подобная задача моделирует, например, реальную ситуацию о распределении областей промыслов в рыболовецкой компании между отдельными судами. Предполагается, что места расположений целей (координаты мест промыслов, богатых добычей) разведаны и известны центральному управлению. Ставится задача выбора начальных точек (портов)

для сокращения времени работы. Время работы определяется по времени T_{\max} достижения цели последним из агентов. Эффективность планирования определяется по относительному времени ожидания $\Delta = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$ агента, первым выполнившим задачу за время T_{\min} . Скорость движения агентов предполагается одинаковой, временем «обработки» целей пренебрегаем, поэтому, если скорость агента принять за единицу, время выполнения задачи можно условно считать равным длине всего маршрута. Моделируем операционное пространство плоскостью $x - y$ с начальным местом расположения агентов на оси y . Цели — точки на плоскости с координатами $x_k, y_k, k = 1, \dots, n$, текущие координаты агентов $\xi_k, \eta_k, k = 1, \dots, m$. Для упрощения постановки примем число целей кратным числу агентов $n = Nm$. Таким образом, каждый агент проходит N целей. Сначала рассмотрим два алгоритма решения задачи о планировании маршрутов минимальной длины.

Алгоритм I

На первом этапе, начинающемся от положения агентов $\xi_{k,1} = 0, \eta_{k,1}, k = 1, \dots, m$, определяются минимальные расстояния от начальных положений агентов до целей. Второй индекс 1 здесь означает номер этапа, всего этапов N . Рассмотрим некоторую конкретную модельную задачу (рис. 1) для пяти агентов (судов) и пятнадцати целей ($m = 5, n = 15$). По осям координат отложены расстояния в километрах. Скорость судна примем 10 уз (18,5 км/ч). Может оказаться, что у нескольких агентов будет выбрана одна цель. В этом случае выбирается агент, у которого расстояние до цели меньше, цель закрепляется за этим агентом и выбывает из множества целей на следующем цикле алгоритма. Первый этап с циклическим (не более m циклов) перебором минимальных расстояний заканчивается, когда каждый агент получит по закрепленной за ним цели с координатами $x_{k,1}, y_{k,1}, k = 1, \dots, n$ (рис. 2). На следующем, втором, этапе агенты перемещаются в свои найденные цели, т. е. $\xi_{k,2} = x_{k,1}, \eta_{k,2} = y_{k,1}, k = 1, \dots, m$, и алгоритм повторяется с первого этапа, но с уменьшенным на m (по числу агентов) числом целей и выбранными маршрутами первого этапа.

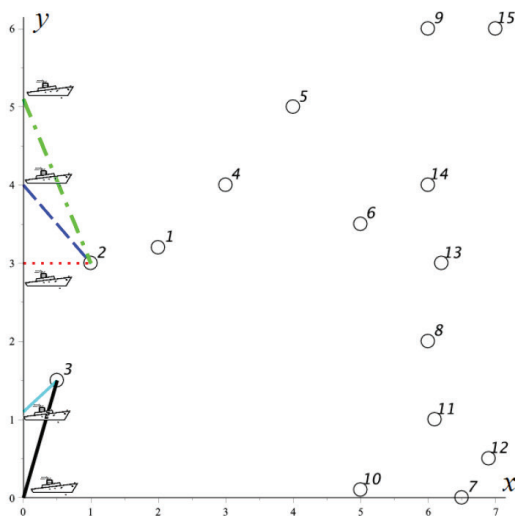


Рис. 1. Начало первого этапа алгоритма I

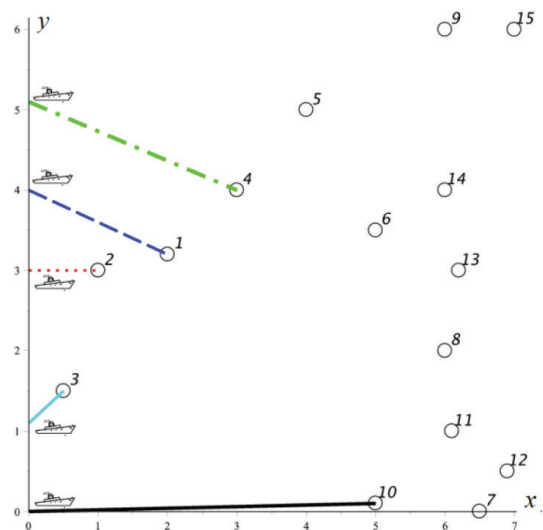


Рис. 2. Конец первого этапа алгоритма I

Алгоритм заканчивает свою работу за N циклов, по два этапа в каждом (рис. 3). Замечена неустойчивость результатов по отношению к вариации координат целей. Так, если немного изменить координату x цели № 7, то маршруты могут измениться значительно (рис. 3 – 5). При $x_7 = 6,1$ оценка эффективности выбранного пути $\Delta_{6,1} = 0,48$ аналогична, при $x_7 = 6,2 \dots 6,4$ имеем $\Delta_{6,2} = 0,44, \Delta_{6,5} = 0,18$. Для выбранной скорости судна это соответствует ожиданию 17 мин и 5 мин. Первоначальные координаты $\eta_{k,1}, k = 1, \dots, m$ агентов здесь выбраны произвольно.

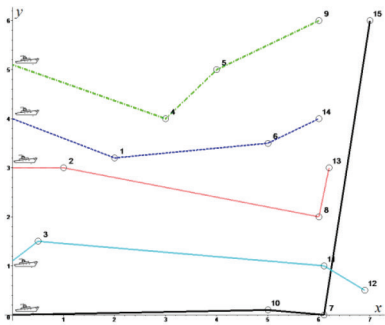


Рис. 3. $x_7 = 6,1$

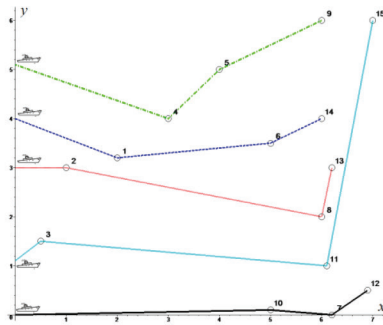


Рис. 4. $x_7 = 6,2$

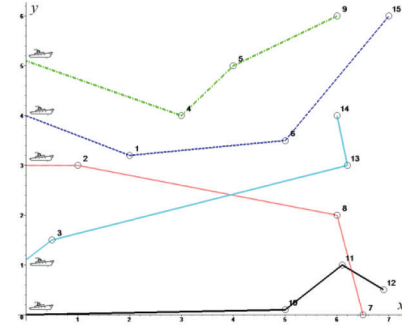


Рис. 5. $x_7 = 6,5$

Отметим, что если число целей и агентов совпадает, то поставленная задача о минимальной суммарной длине маршрутов совпадает с задачей о назначениях и решается с помощью алгоритма Куна (венгерский алгоритм) [26, с. 249]. Более того, в тех случаях, когда в конце первого этапа цели для всех агентов определены, можно применить решение задачи о назначениях. Практический опыт показывает, что это имеет смысл при большом числе агентов. В рассматриваемых примерах уточняющее решение задачи Куна не меняло распределение целей и агентов.

Алгоритм II

Задача о минимальном маршруте решается последовательно для каждого агента. Выбирается произвольный агент и определяется наиболее близкая к нему цель. Затем агент размещается в новом положении, и задача опять повторяется до тех пор, пока агент не пройдет положенные ему N целей. Затем эти цели вычеркиваются из списка целей, и задача решается для другого агента. Очевидно, этот алгоритм относится к локально оптимальным (или «жадным») алгоритмам и имеет тенденцию к попаданию в локальный минимум. Если не прибегать к нейросетевым или генетическим алгоритмам, то единственная возможность избежать попадания в локальный минимум — осуществить полный перебор всех вариантов последовательностей агентов. В рассмотренном примере потребуется перебрать $m! = 120$ вариантов. Одно из решений рассматриваемого примера изображено на рис. 2. Первый агент получил самый короткий путь: цели № 3, 2, 1. Последнему в «очереди» выбора маршрута достался самый длинный путь: цели № 9, 15, 11. Очевидно, это решение не самое оптимальное.

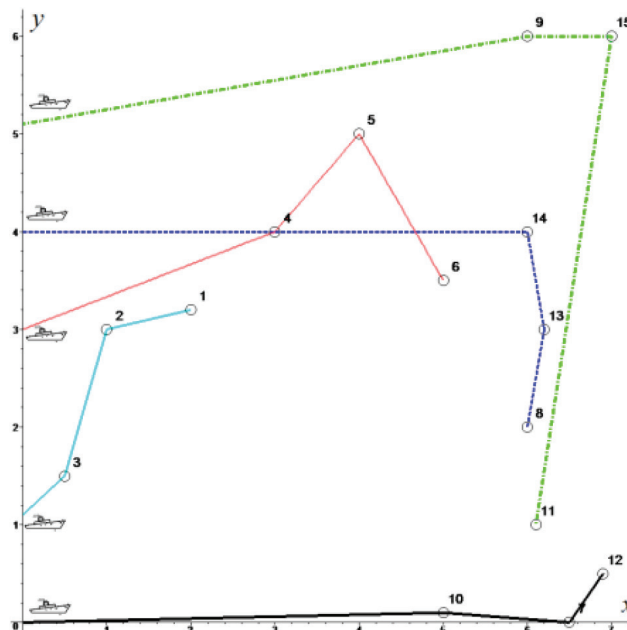


Рис. 6. Работа алгоритма II

Выбор начальных положений агентов

Распределим положения агентов по оси y равномерно вокруг координаты $y_c = \sum_{k=1}^n y_k / n$ центра тяжести точек $x_k, y_k, k = 1, \dots, n$: $\eta_k = y_0 + \varepsilon(k - (m + 1)/2)$. При нечетном числе агентов они располагаются симметрично (выше и ниже) координаты y_c . Параметр ε характеризует амплитуду разброса. При $\varepsilon = 0$ все агенты сосредоточены в одной точке. Вводя эти данные в программу, можно получить зависимость эффективности выбора маршрутов для ε . Обнаружен характерный минимум этой зависимости как для алгоритма I (рис. 7), так и алгоритма II (рис. 8). Задача решалась для 25 целей, случайно расположенных на плоскости $x - y$ и пяти агентов. Программа написана на языке Maple [27]. Встроенные графические операторы позволили получить анимированную картину последовательности выбора целей и продвижения агентов. Соответствующая программа на языке Maple записана в архив [28] и свободна для скачивания. Время счета по обоим алгоритмам для пяти агентов приблизительно одинаковое, однако алгоритм II, содержащий процедуру перебора $m!$ вариантов при большом числе агентов, может оказаться практически невыполнимым из-за нереально большого времени счета, особенно при построении анимационных иллюстраций процесса.

Заметим, что размах расположения агентов при использовании алгоритма II заметно больше, чем для алгоритма I, а эффективность выбора (минимум кривых на рис. 7 и 8) в обоих случаях приблизительно одинаковая.

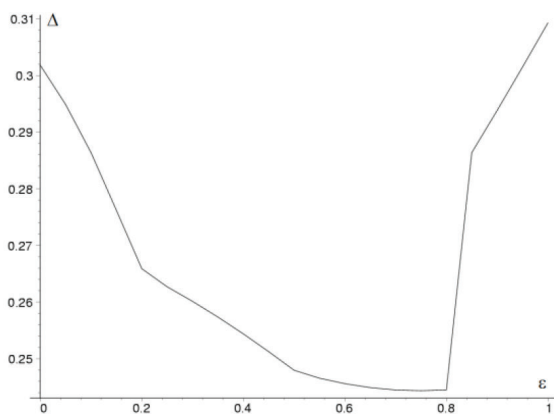


Рис. 7. Алгоритм I. Выбор положений агентов

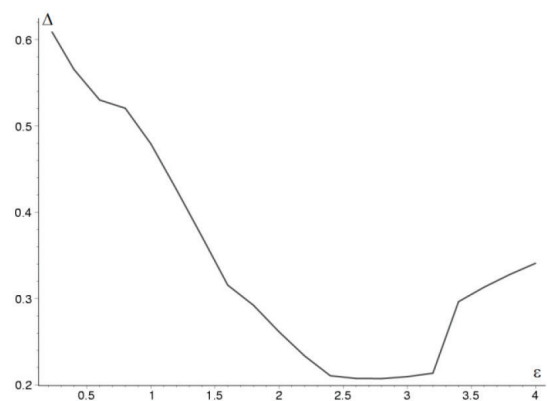


Рис. 8. Алгоритм II. Выбор положений агентов

Выводы

В представленных алгоритмах, с одной стороны, естественным образом содержится задача минимизации пути и координация действий отдельных агентов, имеющих общую цель, в данном случае — покрытия пространства с целевыми точками. С другой стороны, алгоритмы имеют дополнительные управляющие параметры — координаты начальных положений агентов и при необходимости возможность выбора расписания их движения, включая изменение скорости и организации остановок. Эти параметры позволяют решать и другие задачи, в частности здесь решена задача об оптимальном распределении начальных положений агентов. При этом следует оговориться, что алгоритм II приведен только для сравнения и годится как несложный вариант решения задачи при малом числе агентов. Его единственное достоинство — простота программирования и возможность реализации элементарными программными средствами. На основании применения обоих алгоритмов найдена интересная и неочевидная особенность: наличие точки экстремума при выборе амплитуды разноса целей от естественного нулевого положения y_c , выбранного по данным о распределении целей. Алгоритмы легко изменяются для учета времени «обработки» целей, назначения условных ценностей направлений и отдельных целей. Также может быть введен учет изменяющихся внешних условий — течения, направления ветров и т. д. Идеология алгоритмов формальным добавлением третьей координаты по-

зволяет применить их для решения пространственных задач по аналогии, как это выполнено в [21], [22] в задаче о планировании оптимального маршрута подводной лодки с учетом размеров конечных препятствий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-01-00429.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Касьянов В. Н.* Графы в программировании: обработка, визуализация и применение / В. Н. Касьянов, В. А. Евстигнеев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 1104 с.
2. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
3. *Gao S.* Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks / S. Gao, H. Huang // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2012. — Vol. 21. — Pp. 196–213.
4. *Fu L.* An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information / L. Fu // *Transportation Research Part B: Methodological*. — 2001. — Vol. 35. — № 8. — Pp. 749–765. DOI:10.1016/S0191-2615(00)00019-9.
5. *Castillo O.* Multiple Objective Genetic Algorithms for Path-planning Optimization in Autonomous Mobile Robots / O. Castillo, L. Trujillo, P. Melin // *Soft Computing*. — 2007. — Vol. 11. — № 3. — Pp. 269–279. DOI: 10.1007/s00500-006-0068-4.
6. *Fonseca C. M.* Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization / C. M. Fonseca, C. J. Fleming // *5th international conference genetic algorithms*. — 1993. — Pp. 416–423.
7. *Каляев И. А.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. — М.: Физматлит, 2009. — 280 с.
8. *Каляев И. А.* Управление группой БЛА в задаче формирования строя / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян // *Робототехника и техническая кибернетика*. — 2014. — № 4 (5). — С. 28–39.
9. *Александров В. А.* Коллективный алгоритм выделения операционных подпространств для группы роботов при решении задачи покрытия территории / В. А. Александров, А. И. Кобрин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2011. — № 9. — С. 65–69.
10. *Александров В. А.* Аппаратно-программный комплекс для моделирования задач группового управления мобильными роботами / В. А. Александров, А. И. Кобрин // *Вестник МЭИ*. — 2011. — № 3. — С. 88–95.
11. *Александров В. А.* Исследование алгоритма выделения операционных подпространств при решении задачи покрытия территории группой роботов / В. А. Александров, А. И. Кобрин // *Мат. междунар. молодежной науч.-практ. конф. «Мобильные роботы и мехатронные системы»*. — М.: Изд-во Московского университета, 2011. — С. 19–22.
12. *Александров В. А.* Коллективно-ориентированные мобильные роботы для исследования алгоритмов группового управления / В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. — 2014. — № 1. — С. 70–76.
13. *Кобрин А. И.* Программно-аппаратный комплекс для моделирования задач обучения, потоковой обработки сенсорной информации и адаптивного группового управления мобильными роботами / А. И. Кобрин, В. А. Александров, О. Ю. Синявский // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. — 2011. — № 4–5. — С. 2238–2240.
14. *Kuipers B.* A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations / B. Kuipers, Y.-T. Byun // *Robotics and Autonomous Systems*. — 1991. — Vol. 8. — № 1–2. — Pp. 47–63. DOI:10.1016/0921-8890(91)90014-C.
15. *Александров В. А.* Разрешение конфликтных ситуаций в коллективе автономных аппаратов / В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. — 2013. — Т. 19. — № 24 (127). — С. 6–10.

16. Александров В. А. Программное обеспечение комплекса аппаратного моделирования алгоритмов группового управления / В. А. Александров, К. А. Кирик, А. И. Кобрин // Trends in Applied Mechanics and Mechatronics. — М: Инфра-М, 2015. — Т. 1. — С. 66–69.
17. Sinyavskiy O. Y. Construction of adaptive robot control system and robot sensor information processing using spiking neural networks / O. Y. Sinyavskiy, A. I. Kobrin // Proceedings Taiwan-Russian Bilateral Symposium on Problems in Advanced Mechanics. — М.: Moscow State University, 2010. — Pp. 218–227.
18. Breitenmoser A. Voronoi coverage of nonconvex environments with a group of networked robots / A. Breitenmoser, M. Schwager, J. C. Metzger, R. Siegwart, D. Rus // Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. — IEEE, 2010. — Pp. 4982–4989.
19. Шкорупо Д. А. Оптимизация морской транспортной сети в линейном судоходстве / Д. А. Шкорупо, М. В. Волощук // Економічні інновації. — 2012. — № 49. — С. 253–266.
20. Dedkov V. A. The problem of control for multirobot systems / V. A. Dedkov, M. N. Kirsanov // Инновационные информационные технологии. — 2013. — Т. 2. — № 2. — С. 206–213.
21. Hachour O. A Three dimensional Path Planning algorithm / O. Hachour // Proceeding ICS'10. 14th WSEAS international conference on Systems : part of the 14th WSEAS CSCC multiconference. — 2010. — Vol. I. — Pp. 60–65.
22. Kirsanov A. Path planning for the autonomous underwater vehicle / A. Kirsanov, S. Anavatti, T. Ray // Lecture Notes in Computer Science. — 2013. — Vol. 8298. — Part 2. — Pp. 476–486. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1_43.
23. Zeng Z. A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles / Z. Zeng, L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, A. Lammas // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 110. — Part A. — Pp. 303–313. DOI:10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.
24. Ataei M. Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle / M. Ataei, A. Yousefi-Koma // Robotics and Autonomous Systems. — 2015. — Vol. 67. — Pp. 23–32. DOI:10.1016/j.robot.2014.10.007.
25. Alvarez A. Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean / A. Alvarez, A. Caiti, R. Onken // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — 2004. — Vol. 29. — № 2. — Pp. 418–429. DOI: 10.1109/JOE.2004.827837.
26. Асанов М. О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М. О. Асанов, В. А. Баранский, В. В. Расин. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 288 с.
27. Голоскоков Д. П. Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: ПаркКом, 2010. — 644 с.
28. [Архив]. — Режим доступа: <http://vuz.exponenta.ru/Maple-path-animation.rar>

ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR THE SELECTION OF OPTIMAL ROUTES THE GROUP'S VESSELS

The problem of constructing shortest routes for a group of ships that received task of achieving arbitrary targets with known coordinates, located in a confined space is proposed and solved. We considered the case when the number of targets of all courts are the same. The task is completed by the courts when reaching all their goals. It is proposed two algorithm for solving the problem of coordination of the courts with the expectation of a minimum length routes. The efficiency of solving the problems of the choice of routes is estimated by the waiting time of the ship, the last under the objective. The problem of the optimal selection of the initial positions of ships is studied. Numerical experiment detects extreme values of the parameter of the distribution of vessels in the assumption of their uniform distribution on a preselected straight line. The proposed algorithms and the conclusions of their analysis can find application in the movement of sea, air and land transport.

Keywords: route, target, algorithm, path optimization, group management, transport

REFERENCES

1. Kasjanov, V. N., and V. A. Evstigneev. *Grafy v programmirovanii: obrabotka, vizualizacija i primenenie*. SPb.: BHV-Peterburg, 2003.

2. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
- Gao, S., and H. Huang. "Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 21 (2012): 196–213.
4. Fu, L. "An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information." *Transportation Research Part B: Methodological* 35.8 (2001): 749–765. DOI:10.1016/S0191-2615(00)00019-9.
5. Castillo, O., L. Trujillo, and P. Melin. "Multiple Objective Genetic Algorithms for Path-planning Optimization in Autonomous Mobile Robots." *Soft Computing* 11.3 (2007): 269–279. DOI: 10.1007/s00500-006-0068-4.
6. Fonseca, C. M., and C. J. Fleming. "Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization." *5th international conference genetic algorithms* (1993): 416–423.
7. Kaljaev, I. A., A. R. Gajduk, and S. G. Kapustjan. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravlenija v gruppah robotov*. M: Fizmatlit, 2009.
8. Kalyaev, I. A., A. R. Gaiduk, and S. G. Kapustyan. "UAV group control in task of order forming." *Robotics and Technical Cybernetics* 4(5) (2014): 28–39.
9. Alexandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "Collective operational environment subspace dividing algorithm for the robotic group in the coverage area problem." *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 9 (2011): 65–69.
10. Alexandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "The hardware-software complex for modeling of grouped control problems for mobile robots." *MPEI Vestnik* 3 (2011): 88–95.
11. Aleksandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "Issledovanie algoritma vydelenija operacionnyh podprostranstv pri reshenii zadachi pokrytija territorii gruppov robotov." *Materialy mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Mobilnye roboty i mehatronnye sistemy»*. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2011: 19–22.
12. Alexandrov, V. A., K. A. Kirik, and A. I. Kobrin. "Collective Tasks Targeted Mobile Robots for Multi-robot Control Algorithms Development." *Russian Internet Journal of Industrial Engineering* 1 (2014): 70–76.
13. Kobrin, A. I., V. A. Aleksandrov, and O. Yu. Sinyavskiy. "Software and hardware system for processing sensor data and adaptive control of mobile robot group." *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod* 4–5 (2011): 2238–2240.
14. Kuipers, B., and Y.-T. Byun. "A Robot Exploration and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations." *Robotics and Autonomous Systems* 8.1–2 (1991): 47–63. DOI:10.1016/0921-8890(91)90014-C.
15. Alexandrov, V. A., K. A. Kirik, and A. I. Kobrin. "Conflict resolution in the group of autonomous apparatus." *Izvestia VSTU* 19.24(127) (2013): 6–10.
16. Aleksandrov, V. A., K. A. Kirik, and A. I. Kobrin. "Programmnoe obespechenie kompleksa apparatnogo modelirovanija algoritmov gruppovogo upravlenija." *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. M: Infra-M, 2015. T. 1. 66–69.
17. Sinyavskiy, O. Y., and A. I. Kobrin. "Construction of adaptive robot control system and robot sensor information processing using spiking neural networks." *Proceedings Taiwan-Russian Bilateral Symposium on Problems in Advanced Mechanics*. M.: Moscow State University, 2010: 218–227.
18. Breitenmoser, Andreas, M. Schwager, J. C. Metzger, R. Siegwart, and D. Rus. "Voronoi coverage of non-convex environments with a group of networked robots." *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010: 4982–4989.
19. Shkorupo, D. A., and M. V. Voloshuk. "The supply chain optimization problems in the liner network services." *Ekonomichni innovacii* 49 (2012): 253–266.
20. Dedkov, V. A., and M. N. Kirsanov. "The problem of control for multirobot systems." *Innovacionnye informacionnye tehnologii* 2.2 (2013): 206–213.
21. Hachour, O. "A Three dimensional Path Planning algorithm." *Proceeding ICS'10. 14th WSEAS international conference on Systems : part of the 14th WSEAS CSCC multiconference*. 2010. Vol. I. 60–65.
22. Kirsanov, A., S. Anavatti, and T. Ray. "Path planning for the autonomous underwater vehicle." *Lecture Notes in Computer Science* 8298.2 (2013): 476–486. DOI: 10.1007/978-3-319-03756-1_43.
23. Zeng Z., L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, and A. Lammas. "A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles." *Ocean Engineering* 110 (2015): 303–313. DOI:10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.

24. Ataei, M., and A. Yousefi-Koma. "Three-dimensional optimal path planning for waypoint guidance of an autonomous underwater vehicle." *Robotics and Autonomous Systems* 67 (2015): 23–32. DOI:10.1016/j.robot.2014.10.007.
25. Alvarez, A., A. Caiti, and R. Onken. "Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 29.2 (2004): 418–429. DOI: 10.1109/JOE.2004.827837.
26. Asanov, M. O., V. A. Baranskij, and V. V. Rasin. *Diskretnaja matematika: grafy, matroidy, algoritmy*. Izhevsk: NIC "Reguljarnaja i haoticheska ja dinamika", 2001.
27. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoj fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
28. Archive. <<http://Vuz.Exponenta.Ru/Maple-Path-Animation.Rar>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Курсанов Михаил Николаевич —
доктор физико-математических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
C216@Ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirsanov Mihail Nikolaevich —
Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor.
MPEI
C216@Ya.ru

Статья поступила в редакцию 24 февраля 2016 г.

УДК 656.621/.626

**И. В. Кукушкин,
А. П. Нырков,
А. А. Нырков**

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КАБОТАЖНЫХ ГРУЗОВ

В данной работе рассмотрено построение имитационной модели процессов переработки каботажных грузов, основанной на генерации подчиненных гамма-распределению случайных величин. Так же, как и имитационная модель, основанная на равномерном распределении данная модель дает приближенные к реальным значения статистических величин, таких как математическое ожидание времени ожидания каботажных судов в очереди и в терминале. Эти величины получаются более достоверными по сравнению с марковской (классической) моделью массового обслуживания, которая дает немного завышенные значения вероятностных характеристик. В рамках данной статьи дана математическая формулировка задачи и предложены основные алгоритмы работы программы. В работе приведены таблицы, позволяющие дать оценку влияния среднеквадратичных отклонений случайных величин на вероятностные характеристики процессов. Алгоритм послужил основой для разработки программы, вычисляющей вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов.

Ключевые слова: обработка каботажных судов, имитационное моделирование, алгоритмы, гамма-распределение, модель массового обслуживания.

Введение

При моделировании реальных систем и процессов одной из наиболее сложных проблем является адекватность модели соответствующей системе или процессу. Не являются исключением и имитационные модели, для которых входные данные являются случайными величинами [1]. Законы распределения вероятностей входных параметров модели существующего объекта можно получить путем сбора и анализа данных функционирования этого объекта. В этом случае в качестве законов распределения входных параметров модели нередко используют функции эмпири-