

А.И. Михалёв, А.А. Стенин, В.П. Пасько,
А.С. Стенин, Ю.А. Тимошин

СИТУАЦИОННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКТИРОВКА МАРШРУТА АВТОНОМНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Аннотация. На базе интеллектуальной системы поддержки принятия решений предложены два пути реализации оптимальных стратегий процесса принятия решений, основанных на математическом аппарате теории марковских и полумарковских процессов с использованием принципа оптимальности Беллмана.

В работе предложены два пути реализации оптимальных стратегий процесса принятия решений, основанных на математическом аппарате теории марковских и полумарковских процессов с использованием принципа оптимальности Беллмана.

Рассмотренные пути реализации оптимальных стратегий процесса принятия решений касаются стратегии на непродолжительном конечном интервале времени реализации доставки груза, что наиболее часто встречается на практике, и длительном интервале доставки груза относительно всей задачи в целом. Кроме того, в работе рассматриваются пути нахождения оптимальных стратегий, когда время принятия единичных решений фиксировано и когда время перевода реализуется интеллектуальная система поддержки принятия решений случайным образом.

Ключевые слова: подводный робот, выбор маршрута, ситуационная сеть, интеллектуальная система поддержки принятия решений, марковские и полумарковские процессы, оптимальные стратегии принятия решений.

Введение. При оценке эффективности применения подводного робота (ПР) принципиальное значение имеет степень его информационной автономности, т.е. способности самостоятельно действовать в неизвестной или недостаточно определенной среде[1]. В настоящее время миссии (задания) для ПР формируются с использованием императивных методов программирования (как текстовых, так и графических), детально описывающих последовательность действий робота, которые нужно совершить для достижения требуемой цели. При этом представление о самой цели имеет только оператор ПР, который составляет миссию, например, доставки груза в целевую точку. Подобная технология эффективна, если миссия робота осуществляется в рамках априорного сценария. В остальных случаях она может либо вообще не выполняться, либо выполняться с большими нарушениями и угрозой безопасности аппарата.

Поэтому для выполнения миссии при непредвиденных обстоятельствах исключительное значение имеет «интеллектуализация» системы управления автономного ПР, т.е. создание автономного роботизированного подводного аппарата (АРПА) с элементами искусственного интеллекта[2,3]. Интеллектуализация АРПА подразумевает способность системы управления осуществлять функции анализа сцен и общей обстановки, ориентирования в водной среде, сбора и накопления разнообразной информации. Использование традиционных методов планирования, в данном случае, невозможно из-за вероятного возникновения на маршруте непредвиденных ситуаций.

Отсюда, ситуационный подход в принятии решений при планировании маршрута АРПА весьма актуален и позволяет не только оценить возможную ситуацию на маршруте, но и определить управляющие решения для оперативной корректировки маршрута с использованием интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) Разработка моделей процесса маршрутизации основана на представлении ситуационной модели в виде узлов графа, переходы которого соответствуют управляющим решениям. Такое представление получило название нечеткой ситуационной сети (НСС) [4-7].

Постановка задачи. Рассмотрим задачу ситуационного планирования и оперативной корректировки маршрута АРПА для доставки груза в целевую точку при вероятном возникновении на маршруте «непредвиденных» ситуаций. Будем считать, что на АРПА бортовая вычислительная навигационная аппаратура, а также система технического зрения, что позволяет при наличии необходимой информации на базе ИСППР планировать маршрут и корректирующие управляющие решения (оперативное управление) при возникновении непредвиденных ситуаций.

Пусть ситуационный шаг управления представляется формулой:

$$S_{net} : S_j \xrightarrow{U_k} S_{ij}$$

где S_{net} – выполнение опорного (первоначального) плана; S_j – текущая ситуация (узел W_j); S_{ij} – новая ситуация (узел W_j корректировка опорного плана); U_k – выбор маршрута в «непредвиденной» ситуации (выбор модели доставки). Задачи оперативного управления выбора маршрута доставки требуют привлечения дополнительных методов, среди которых хорошо себя зарекомендовали методы, основанные на представлении совокупности типовых состояний системы в виде узлов графа, переходы которого соответствуют управляющим решениям. Ситуационная сеть S_{net} представлена в виде ориентированного графа $S_{net}=(W,A)$, где W -множество узлов(состояний), а A – множество дуг-переходов между состояниями графа, т.е.

$$S_{net} = (W, A); \quad W = (w_i | i=1, \dots, N); \quad A = (a_{ij} | i=1, \dots, N; j=1, \dots, N)$$

Необходимо разработать оптимальные стратегии принятия решений реализации опорного маршрута и, в случае возникновения «непредвиденной ситуации», соответствующее ей множество управляющих решений, для достижения целей планирования и оперативного управления выбором маршрута доставки, для чего необходимо определить возможные последствия управляющих решений на несколько шагов вперед.

Реализация оптимальных стратегий принятия решений. Принятие решений в общем виде можно рассматривать как ветвящийся процесс образования и преобразования иерархических структур, реализуемый двумя способами, отображающими характер изменения этих структур от исходной к заданной [3]. При первом способе исходная ситуация является начальной $S(\tau_0)$ и выбирается такая цепочка последовательного выполнения операций R_{jk} ($k=1, 2, \dots, T-\tau_0$), которая ведет к заданной ситуации $ST=S(T)$. Указанный процесс можно представить следующей последовательностью:

$$S(\tau_0)R_{j_1}S(\tau_0+1)R_{j_2} \dots S(T-\tau_0)R_{j_{T-\tau_0}}S(T) \quad (1)$$

Указанная последовательность может быть определена триадой $S(\tau_0)RS(T)$, т.е. по $S(\tau_0)$ и $S(T)$ отыскивается R . В этом случае процесс нахождения R может быть представлен индуктивной цепочкой последовательного нахождения состояний $S(\tau_0+k)$.

При втором способе используется так называемое попятное движение. В качестве начальной ситуации $S(\tau_0)$ выступает заданная ситуация $S(T)$, а в качестве цели $S(T)$ - исходная ситуация $S(\tau_0)$. Так же как и при первом способе отыскивается цепочка операций R_{jk} , переводящая $S(\tau_0)=S(T)$ в $S(T)=S(\tau_0)$, т.е. реализуется последовательность (1), но в обратном порядке. При определении общего преобразования R последовательность операций, так же как и в первом случае, сократится до триады. Здесь также имеется схема индуктивного решения, однако процесс нахождения R_{jk} носит дедуктивный характер, т.е. по $S(T)$ отыскивается $S(T-\tau_0)$ и т.д.

В обоих способах процесс решения предполагает исключения из рассмотрения запрещенных ситуаций. При этом обычно используется прошлый опыт. Таким образом, задача определения оптимальной стратегии процесса принятия решений заключается в определении таких составляющих r_{ij}^k матрицы выигрышей R^k , которые для некоторых стратегий k принесут максимальный выигрыш. При этом, как в первом, так и во втором случае на практике возможны два пути оптимизации принимаемых оператором решений.

Первый путь заключается в выборе решений из сравнительно небольшого набора возможных вариантов, а критерием служит отклонение от оптимального способа решения, т.е. ошибки. Ограничением здесь выступает время принятия решений.

Второй путь соответствует режиму работы, при котором основное внимание обращается на недопустимость ошибок. Время принятия решения изменяется при этом в широких пределах, а критерием оптимальности принятых решений является время, за которое найдены наилучшие решения.

Рассмотрим первый из упомянутых путей оптимизации.

Для управляемой системы с N возможными состояниями $i=1, \dots, N$. В каждом состоянии i оператор может принять L_i возможных решений (стратегий), совокупность которых для всех состояний системы в рассматриваемый интервал времени составляет политику оператора. Стратегия оператора может быть выражена как матрица переходных вероятностей $p_{ij} = \|p_{ijk}\|$ от состояния i к состоянию j . Приведем ей в соответствие матрицу выигрышей $R_k = \|r_{ijk}\|$, получаемых от реализации каждого решения оператора.

Если проводится анализ поиска оптимальной стратегии на конечном интервале времени, то может быть оценен общий выигрыш от той или иной политики оператора.

При этом очевидно, что система управления переходит из одного состояния в другое через равные интервалы времени. Считая, что последствие отсутствует, процесс принятия решений можно описать аппаратом теории марковских процессов.

Кроме того, для анализа стратегий работы оператора на конечном интервале времени, когда имеется набор возможных вариантов решений, для получения эталонной оптимальной стратегии предлагается использовать стандартную процедуру метода динамического программирования [8].

В этом случае полный ожидаемый выигрыш за n шагов будет равен:

$$v_i(n) = \sum_{j=1}^N p_{ij} [r_{ij} + v_j(n-1)] = \sum_{j=1}^N p_{ij} r_{ij} + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j(n-1) \quad (2)$$

$$\text{или} \quad v_i(n) = q_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j(n-1),$$

где $q_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} r_{ij}$ - минимальный ожидаемый выигрыш, а оптимальная стратегия будет соответствовать критерию оптимальности $(n+1)$ -го решения:

$$v_i(n+1) = \max_k \{q_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j(n)\}, k = 1, \dots, \Delta_i, i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

При неограниченном времени протекания оцениваемой деятельности оператора суммарный выигрыш системы также растет неограниченно, поэтому политику оператора можно оценивать по среднему ожидаемому доходу от реализации одного решения.

В этом случае задачу поиска оптимальной стратегии можно рассматривать по отдельным актам принятия решений вне зависимости от интервалов времени, в которые они реализуются.

Для нахождения такой политики можно воспользоваться итеративным процессом. Если политика оператора фиксирована, то поиск оптимальной стратегии сводится к решению системы уравнений:

$$q + v_i = g_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j \quad (4)$$

с использованием критерия

$$q^k = \max_k \{g_i^k + \sum_{j=1}^N p_{ij}^k v_j - v_i\} \quad (5)$$

Общая процедура поиска оптимальной стратегии принятия решений при фиксированных v_i сводится к следующему. При фиксированной политике A решается система уравнений (4), причем в ней v_j при $j=N$ полагается равным нулю (поскольку нам важны разности $v_i - v_j$ относительных весов, а не их абсолютные значения). Затем найденные веса v_i^A подставляются в формулу (5), и для каждого i находится максимальное значение критерия, и набор стратегий, на котором достигается максимальное среднее значение критерия, принимается за новую политику A_1 .

При втором пути реализации процесса принятия решений время принятия отдельных решений колеблется в широких пределах за счет достижения точного решения. В этом случае для реализации эталонных стратегий принятия решений предлагается использовать аппарат теории полумарковских процессов. При этом система управления перед тем как перейти из состояния i в состояние j , находится в состоянии i случайное время $\tau_{ij}=m$ с плотностью распределения $f_{ij}(\tau_{ij} = m) = N(\tau_{ij} = m)$. Значением $f_{ij}(m)$ определяется вероятность того, что система в состоянии i проводит ровно m единиц времени, прежде чем перейти в j . Если политика решений оператором описывается как полумарковский процесс [9], то оп-

тимальная стратегия k в состоянии i может быть выбрана на основании анализа переходных вероятностей p_{ij}^k , плотности распределения $h_{ij}^k(m)$, а также системных выигрышей типа $y_{ij}^k(l)$ и $b_{ij}^k(m)$. Здесь $b_{ij}^k(m)$ - системный выигрыш от перехода системы, находившейся в течение времени m в состоянии i из состояния i в состояние j при k -й оптимальной стратегии оператора, $y_{ij}^k(l)$ - выигрыш от пребывания системы в данном состоянии i в течении временного интервала $(l-1, l)$, пропорциональный некоторой норме выигрыша за единицу времени при k -й оптимальной стратегии.

При таких допущениях задача может быть сформулирована как задача максимизации одношагового выигрыша, либо как задача максимизации полного ожидаемого дохода.

Как и при марковских процессах будем рассматривать полумарковские процессы конечной и бесконечной длительности [9]. В первом случае задача состоит в определении политики, максимизирующей полный ожидаемый выигрыш от процесса, до конца функционирования которого осталось n единиц времени. В случае процессов бесконечной длительности задача может быть сформулирована либо как задача максимизации одношагового выигрыша (аналогично задаче для марковских процессов бесконечной длительности), либо как задача максимизации полного ожидаемого дохода. В общем виде можно оперировать критерием, получаемым в соответствие с принципом оптимальности Беллмана [8]:

$$v_i(n) = \max_k \left\{ \sum_{j=1}^N p_{ij}^k \sum_{m=n+1}^{\infty} f_{ij}^k(m) \left[\sum_{l=1}^{n-1} y_{ij}^k(l) + v_i(0) \right] + \sum_{j=1}^N p_{ij}^k \sum_{m=0}^n f_{ij}^k(m) \left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}^k(l) + r_{ij}^k(m) + v_j(n-m) \right] \right\}$$

(6)

где $i = \overline{1, N}, n = 1, 2, 3, \dots$

Средний ожидаемый доход r_i от пребывания системы в состоянии i и ухода из этого состояния при длительном функционировании процесса будет:

$$r_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} \sum_{m=0}^{\infty} h_{ij}(m) \left[\sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l) + b_{ij}(m) \right].$$

(7)

Следует заметить, что для процессов с одним эргодическим классом, когда предельная вероятность j -го состояния не зависит от начального состояния, прибыль одинакова для всех состояний процесса.

Политику, оптимальную в смысле максимизации одношаговой прибыли процесса, т. е. среднего ожидаемого дохода за единицу времени, можно найти с помощью итеративного процесса, описанного выше и использующего критерий

$$q^k = q_i^k + \frac{1}{\tau_i^k} \left[\sum_{j=1}^N p_{ij} v_j - v_i \right] \rightarrow \max_k \quad (8)$$

Заключение. Таким образом, в работе предложены два пути реализации оптимальных стратегий процесса принятия решений, основанных на математическом аппарате теории марковских и полумарковских процессов с использованием принципа оптимальности Беллмана.

Рассмотренные пути реализации оптимальных стратегий процесса принятия решений касаются стратегии на непродолжительном конечном интервале времени реализации доставки груза, что наиболее часто встречается на практике, и длительном интервале доставки груза относительно всей задачи в целом. Кроме того, в работе рассматриваются пути нахождения оптимальных стратегий, когда время принятия единичных решений фиксировано и когда время перевода реализуется ИСППР случайным образом.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Автоматические подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1981. – 223 с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 400 с.
3. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 6-17.
4. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. – 272 с.
5. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. – М.: Наука.- Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 288 с.
6. Прикладные нечеткие системы/ Под ред. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно. М.: Мир, 1993. – 368 с.
7. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
8. J. Casti, "The linear quadratic control problem: some recent results and outstanding problems," SIAM Rev., 22 (4), 1980, pp.459–485.
9. Булинский А.В., Ширяев А.Н. Теория случайных процессов. -М.: Физматлит, 2005. - 403с.

REFERENCES

1. Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V., Molokov, Y.G., Nikiforov V.V., Rylov N.I. Avtomaticheskie podvodnie apparaty.- L.:Sudostroenie, 1981. -223 s.
2. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu. V. Avtonomnie podvodnie roboty. Systemy i technology / pod obshei redakciey M. D. Ageev. -Moskva: Nauka, 2005. -400 s.

3. Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Matvienko Yu.V. Sozdanie intellectualnih ANPA i problemy integracii nauchnih issledovaniy // Podvodnie issledovaniya i robototekhnika. - 2006. - № 1. – ss. 6-17.
4. Melikhov A.N., Berstein L.S., Korovin S.Ya. Situatsionie sovetujshie systemy s nechetkoy logikoy. M.: Nauka,1990.-272 s.
5. Pospelov D.A. Situatsionoe upravlenie: Teorya s praktika – M.:Nauka,1986.-288 s.
6. Prikladny nechetky systemy /Pod red. Terano T., Asai K., Sugeno. M.:Mir,1993. -368 s.
7. Trahtengerts E.A. Computernaya poddergka prinyatsya resheniy. M.: SINTEG, 1998. - 376 s.
8. J. Casti, " The linear quadratic control problem: some recent results and outstanding problems, " SIAM Rev., 22 (4), 1980, pp.459-485.
9. Bulinsky A.V., Shiryaev A. N. Teorya sluchaynih processov. - M.: Fizmatlit, 2005. - 403s.

Received 01.02.2019.

Accepted 11.02.2019.

Ситуаційне планування та оперативне коригування маршруту автономного роботизованого підводного апарату

На основі інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень запропоновано два шляхи реалізації оптимальних стратегій прийняття рішень на основі математичного апарату теорії марківських і напівмарківських процесів з використанням принципу оптимальності Беллмана.

В роботі запропоновані два шляхи реалізації оптимальних стратегій процесу прийняття рішень, заснованих на математичному апараті теорії марковських і напівмарковських процесів з використанням принципу оптимальності Беллмана.

Розглянуті шляхи реалізації оптимальних стратегій процесу прийняття рішень стосуються стратегії на нетривалому кінцевому інтервалі часу реалізації доставки вантажу, що найбільш часто зустрічається на практиці, і тривалому інтервалі доставки вантажу щодо всієї завдання в цілому. Крім того, в роботі розглядаються шляхи знаходження оптимальних стратегій, коли час прийняття одиничних рішень фіксоване і коли час перекладу реалізується інтелектуальна система підтримки прийняття рішень випадковим чином.

Situational planning and operational adjustment of the route of the Autonomous robotic underwater vehicle

Currently, missions (tasks) for the underwater robot formed using imperative programming methods (both text and graphic), describing in detail the sequence of robot actions that need performed to achieve the desired goal. At the same time, only the operator of the underwater robot, which makes up the mission, for example, the delivery of cargo to the target point, has an idea of the goal itself. Such technology is effective if the robot's mission carried out within a priori scenario. In other cases, it can either not be executed at all, or it can be executed with large violations and a threat to the safety of the device.

When assessing the effectiveness of an underwater robot, the degree of its information autonomy, i.e. the ability to act independently in an unknown or insufficiently defined environment, is of fundamental importance. Therefore, the "intellectualization" of the Autonomous control system of the underwater robot is extremely important for the mission in unforeseen circumstances. For this propose to use intelligent decision support system. Two ways to implement optimal decision-making strategies based on the mathematical apparatus of the theory of

Markov and semi-Markov processes using the Bellman optimality principle propose. The considered ways of implementation of optimal strategies of decision - making process relate to the strategy for a short finite time of cargo delivery, which is the most common in practice, and for a long interval of cargo delivery relative to the entire task. In addition, the article discusses ways to find optimal strategies when the time of making single decisions is fixed or when the time of translation is implemented randomly.

Hence, the situational approach to decision-making in the planning of the route ARPA is very relevant and allows not only to assess the possible situation on the route, but also to determine the control solutions for the operational adjustment of the route using the intelligent decision support system (ISPR). The development of models of the routing process based on the representation of the situational model in the form of nodes of the graph, the transitions of which correspond to the control solutions.

The paper proposes two ways to implement optimal strategies of decision - making based on the mathematical apparatus of the theory of Markov and semi-Markov processes using the Bellman principle of optimality.

Михалёв А.И. – д.т.н., профессор, Национальной металлургической академии Украины.

Стенин А.А. – д.т.н., профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им.Игоря Сикорского».

Пасько В.П. – к.т.н., доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им.Игоря Сикорского».

Стенин А.С. – студент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им.Игоря Сикорского».

Тимошин Ю.А. – к.т.н., доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им.Игоря Сикорского».

Михальов А.І. - д.т.н., професор, Національної металургійної академії України.

Стенін О.О. - д.т.н., професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Пасько В.П.- к.т.н., доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського».

Стенін А.С. - студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського».

Тимошин Ю.А. - к.т.н., доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім.Ігоря Сікорського».

Mikhalev A.I. - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Metallurgical Academy of Ukraine.

Stenin A.A. - Doctor of Technical Sciences, Professor of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Pasko V.P. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Stenin A.S. - Student of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Timoshin Yu.A. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".