

DOI: 10.25728/mlsd.2023.3674

## ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ АППАРАТОВ, БАЗИРУЮЩИХСЯ НА СУДНЕ-НОСИТЕЛЕ, КАК РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НЕСКОЛЬКИХ КОММИВОЯЖЕРОВ

Дружинин Ю.О., Соколов В.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
ydruzhin@ipu.ru, sok@ipu.ru

*Аннотация.* Предлагается методика расчета работ, проводимых в рамках мониторинга реки или водного бассейна группой автономных необитаемых подводных аппаратов в сопровождении судна-базы, основанная на двухуровневой модели. Приведены примеры мониторинга произвольно расположенных точек инспекции с использованием математического аппарата задачи  $N$  коммивояжеров.

*Ключевые слова:* мониторинг, распределенная управляющая система, статическое расписание, автономный необитаемый подводный аппарат, задача  $N$  коммивояжеров

### Введение

В распределенных системах мониторинга водного бассейна все большее распространение получают подвижные роботизированные комплексы, включающие автономные надводные и подводные необитаемые аппараты. Совместное применение нескольких таких аппаратов сокращает время выполнения поставленной задачи (миссии), но одновременно предъявляет более высокие требования к качеству их планирования.

Планирование работы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) сводится к решению транспортной задачи или задачи нескольких коммивояжеров. При этом учитывается ограниченность энергетических ресурсов (ёмкости аккумуляторов) этих аппаратов.

В работе [1] предложен алгоритм двухуровневого планирования, причем на верхнем уровне планируются энергетические затраты, а на нижнем (топологическом) – оптимальные пути обхода автономными необитаемыми подводными аппаратами инспектируемых объектов. Выполнение данного алгоритма иллюстрируется на примере циклического обхода (патрулирования, инспектирования) ограниченной акватории с периодической подзарядкой аккумуляторов данных аппаратов на береговой базе, которая по умолчанию располагает неограниченными ресурсами для выполнения этой операции.

Авторы в работе [2] рассмотрели данный алгоритм применительно к роботизированной системе с подвижной базой (судном-носителем), имеющей ограниченный запас энергии как для подзарядки АНПА, так и для своего передвижения. Было проведено планирование миссии применительно к инспекции линейного объекта (трубопровода, силового или информационного кабеля), а также объектов с известными координатами.

На нижнем уровне конкретный маршрут находится путем решения задачи  $N$  коммивояжеров [3] (в нашем случае  $N$  АНПА), отличающейся тем, что 1) не происходит возврата в исходную точку движения; 2) в одном цикле зарядки/разрядки аккумуляторов  $N$  АНПА обходят все  $M_1(l)$  объектов инспекции по маршрутам равной длительности так, что каждый из этих объектов посещается только одним автономным необитаемым аппаратом; 3) маршруты всех автономных необитаемых аппаратов одного цикла завершаются в одной точке, которая вместе с тем служит начальной точкой для следующего цикла. (Предполагается также, что отдельные маршруты прокладываются в евклидовых координатах, то есть без учета течений, отмелей и конфигурации берегов).

### 1. Постановка задачи

Введем число точек инспекции, проверяемых в  $l$ -ом цикле, зарядки/разрядки, так что;

$$M = \sum_{l=1}^L M_1(l) \quad (1)$$

В соответствии с работой [3] вводим множество координат точек  $z_i$ , где  $i = 0, 1, \dots, M_1(l) + 1$ , причем точка  $z_0$  – координаты спуска АНПА с борта судна-носителя, а  $z_{M_1(l)+1}$  – точка приема АНПА на борт после завершения цикла работ. Если инспекция предусматривает несколько циклов, то справедливо выражение:

$$z_0(l+1) = z_{M_1(l)+1}(l), \quad (2)$$

В рамках одного цикла вводим также расстояние между объектами  $c_{ij}$ , где  $i, j = 0, 1, \dots, M_1(l) + 1$  – номера объектов инспекции (координаты точек инспекции) и точек сбора. Тогда можно составить матрицу размерностью  $(M_1(l) + 2) \times (M_1(l) + 2)$ , на которой прокладываются маршруты инспекции АНПА.

Все возможные маршруты для каждого АНПА определяются множеством путей  $a$ , допустимой (определяемой запасом электроэнергии) длины  $s_d$ , начинающихся в точке  $z_0(l)$  и заканчивающихся в точке  $z_{M_1(l)+1}(l)$ .

Требуется найти множество маршрутов  $a_N \subset a$ , определяющее пути  $\{a_n, n = 1, 2, \dots, N\}$  допустимой длины  $s_d$  для каждого АНПА, при котором осуществляется инспекция максимального числа объектов.

С учетом введенных определений и обозначений задача нижнего уровня для одного цикла зарядки/разрядки формулируем следующим образом:

$$M_1(l) = \max_{a_N \subset a} \sum_{n=1}^N \sum_{i,j=1}^{M_1(l)} x_{ij} \quad (3)$$

При условиях:

$$\sum_{i,j=1}^{M_1(l)+1} c_{ij} x_{ij} < s_d, \text{ для каждого выбранного пути } a_n, n = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{M_1(l)} x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, M_1(l), j \neq i, \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^{M_1(l)+1} x_{0j} = N, \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{M_1(l)+1} x_{i, M_1(l)+1} = N, \quad (8)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i, j \in a_n, n = 1, 2, \dots, N \\ 0 & \text{в противном случае,} \\ & i, j = 0, 1, \dots, M_1(l) + 1, \quad i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{M_1(l)} \sum_{j=1}^{M_1(l)} x_{ij} + N = M_1(l) \quad (10)$$

Из условий (5) и (6) следует, что каждая точка инспекции посещается одним из  $N$  АНПА только один раз. Ограничения (7) и (8) определяют условия спуска и приема автономного непилотируемого аппарата на борт судна-базы.

Условие (9) определяет переменные  $x_{ij}$ , соответствующие дугам  $i, j$ , входящим в путь  $a_n, n = 1, 2, \dots, N$ .

Условие (10) определяет, что все объекты цикла  $l$  посещены.

Классические транспортные задачи (нахождение минимального расстояния между двумя (начальной и конечной) вершинами на графе или нескольких равных путей для между ними) не подходят, так как они либо не обеспечивают покрытие всех вершин графа (теорема Менгера), либо допускают повторные прохождения одних и тех же вершин (задача Йена) [4].

Поставленную задачу можно рассматривать как задачу  $N$  коммивояжеров, но с переходом не в исходную точку, а в предвычисленную точку. Существующие алгоритмы решения такой задачи заключаются в конечном счете к сведению ее к хорошо изученной задаче одного коммивояжера. Они заключаются в различных способах предварительного разбиения объектов инспекции на несколько областей (кластеров), в каждой из которых действует один или несколько ( $N_1$ ) автономных непилотируемых аппаратов. (Альтернативой может служить задача нескольких коммивояжеров с ограничениями на пропускные способности ребер графа [5]).

Точное решение задачи  $N$  коммивояжеров с ограничениями на время (время движения коммивояжеров не превосходит заданного критического значения) на модификации алгоритма ветвей и границ для хорошо изученной задачи одного коммивояжера.

Для решения задачи  $N$  коммивояжеров также используются различные способы предварительного разбиения объектов инспекции на несколько областей (кластеров), в каждой из которых действует один или несколько ( $N_1$ ) автономных непилотируемых аппаратов, по аналогии с [6].

При этом следует учитывать, что автономные непилотируемые аппараты имеют ограниченный запас электроэнергии ( $E$ ), который обеспечивает ему дальность плавания ( $S$ ), в течение времени ( $T$ ). Время непрерывного движения одного АНПА после одной зарядки аккумуляторов ( $T$ ). зависит от расхода электроэнергии  $\Delta E(v(t))$  (Вт/с), который определяется скоростью движения автономного непилотируемого аппарата. При постоянной скорости движения, т.е.  $v(t) = v = const$ :

$$T = \frac{E}{\Delta E(v)}, \quad (11)$$

$$S = Tv \quad (12)$$

Число объектов инспекции ( $M$ ) также влияет на протяженность маршрута. Если обследование  $i$ -го объекта требует расхода  $E_{1i}$  энергии в течение  $\Delta t_{1i}$ , тогда для одного АНПА, обходящего все  $M$  объектов исследования, получим:

$$S^* = \frac{E - \sum_{i=1}^M E_{1i}}{\Delta E(v)} v \quad (13)$$

$$T^* = \frac{E - \sum_{i=1}^M E_{1i}}{\Delta E(v)} + \sum_{i=1}^M \Delta t_{1i} \quad (14)$$

Таким образом обследование объектов приводит к сокращению длины маршрута и увеличению времени его прохождения. Это справедливо и для группы из  $N$  АНПА.

Рассмотрим несколько частных случаев:

- два АНПА с декомпозицией общего гамильтонова цикла на фрагменты, определяемые однократным зарядом аккумуляторов;
- предварительная кластеризация инспектируемых объектов с последующим распределением по кластерам точек спуска АНПА с борта судна-носителя и точек приема АНПА на борт,
- предварительная кластеризация инспектируемых объектов с определением точек спуска АНПА в кластерах и с возвратом на борт судна-носителя в точки спуска АНПА.

## 2. Построение маршрута судна-базы и пары автономных непилотируемых аппаратов

Предварительно рассмотрим частный случай организации взаимодействия судна-базы с автономными непилотируемыми аппаратами. Судно-база имеет на борту два устройства зарядки и четыре автономных непилотируемых аппарата, причем время работы такого аппарата, то есть, время разрядки его аккумуляторов, превышает время их зарядки. При данных условиях мы можем обеспечить непрерывную одновременную работу двух автономных непилотируемых аппаратов.

При планировании работы такой группировки аппаратов строится гамильтонов цикл по всем объектам инспекции, после чего два автономных непилотируемых аппарата запускаются «навстречу» друг другу: один аппарат осматривает объекты с номерами  $1, 2, \dots, K_1$  по пути обхода, а другой –  $N, N - 1, \dots, K_1$ , где  $K_1$  – место «встречи» аппаратов. К этому же месту подходит и судно-база.

То есть мы находим гамильтонов цикл, а затем делим его пополам, получая две негамильтоновы цепи.

Так как одной зарядки зачастую недостаточно для обхода двумя аппаратами всего заданного пути, то за время одной зарядки они проходят примерно одинаковое расстояние, осматривая в общем

случае неравное количество объектов. В этом случае предварительно проводится расчет движения аппаратов навстречу друг другу, с непрерывным определением расстояния между ними. Когда сумма пройденных аппаратами путей и расстояние между ними достигнет величины  $2S$  (или  $2 * 0.9S$ ), то точка встречи окажется посередине этой прямой, которая вместе с путями, пройденными аппаратами, образует негамильтонов цикл.

Это, однако, приводит к увеличению продолжительности цикла, на время перехода аппаратов к точке встречи с базой, и от точки встречи с базой к следующим по плану объектам.

Если  $s_{1l}$  – расстояние между точками разрыва цикла на пути автономного непилотируемого аппарата, движущегося по гамильтонову циклу по часовой стрелке,  $s_{1l}^*$  – расстояние от последнего объекта в цикле  $l$  до точки подъема аппарата на борт судна-базы,  $s_{1l}^{**}$  – расстояние от места спуска аппарата с судна-базы до первого объекта в  $l+1$  цикле ( $s_{2l}, s_{2l}^*, s_{2l}^{**}$  – соответственно для аппарата, движущегося против часовой стрелки), то тогда путь обхода всех объектов составит:

$$S^* = S + \sum_{l=1}^{L-1} (s_{1l}^* + s_{1l}^{**} - s_{1l}) + \sum_{l=1}^{L-1} (s_{2l} + s_{2l}^{**} - s_{2l}) \quad (15)$$

Возможен и другой вариант, когда каждый из аппаратов проходит максимально возможный при одной зарядке путь, а судно-база последовательно осуществляет ротацию (подъем на борт судна-базы аппарата, израсходовавшего свой запас электроэнергии, и спуск на воду аппарата с полностью заряженными аккумуляторами), переходя от одного аппарата к другому. В этом случае происходит нарастание рассогласования по времени, а, следовательно, увеличение продолжительности выполнения миссии.

### 3. Кластеризация объектов инспекции и построение маршрута судна-базы и $N$ автономных непилотируемых подводных аппаратов

В случае, если судно-база располагает  $N$  автономными непилотируемыми аппаратами и соответствующим числом (например,  $K = N/2$ ) независимых зарядных устройств, и при условии, что время зарядки аккумуляторов АНПА ( $t_{ld}$ ) меньше времени их разрядки ( $t_{entld}$ ) ( $t_{ld} \leq t_{entld}$ ), то, организовав двусменную работу одновременно  $N/2$  АНПА, можно существенно ускорить инспекцию объектов исследования.

Этому должно предшествовать разбиение объектов на отдельные кластеры (кластеризация). Такая кластеризация может быть как естественной, когда разделение на отдельные группы вытекает из их физических свойств, так и искусственной.

Если, например, объекты инспекции примерно равномерно распределены по водоему, то мы можем разбить его на участки, каждый из которых один АНПА может обойти за одну зарядку аккумуляторов.

После применения того или иного алгоритма кластеризации мы можем получить кластеры разной величины (содержащие разное число объектов). В этом случае проводится обход максимального числа кластеров, и по мере того, как в некоторых (наименьших из всех) из них будут проинспектированы все объекты, освободившиеся АНПА будут в следующих циклах задействованы в больших кластерах.

Оставшиеся вне размеченных путей вершины могут быть либо включены в ближайшие к ним пути, либо объединены в отдельный путь.

В этом случае сбор на судне-базе автономных непилотируемых аппаратов завершится после прихода аппарата с самым продолжительным путем прохода. В случае, если одной зарядки батареи достаточно, для инспекции всех объектов исследования, это не имеет существенного значения. Если же подзарядка необходима, то возможно завершение работы первого из пришедших автономных непилотируемых аппаратов во втором цикле до того, как придёт последний из аппаратов в первом цикле.

Предсказуемости поведения группировки автономных непилотируемых аппаратов можно добиться, если разбить инспектируемое пространство на  $K/2$  отдельных фрагмента с примерно равным числом исследуемых объектов. В каждом из фрагментов построить гамильтонов цикл и запустить навстречу друг другу два аппарата. Судно-база перемещается между фрагментами инспектируемого пространства спуская на воду и принимая на борт пары аппаратов.

#### 4. Заключение

Таким образом, алгоритм построения маршрута группировки автономных непилотируемых аппаратов с подвижным судном-базой состоит из следующих шагов:

1. Получение координат объектов инспекции и вычисление минимального пути их обхода без возвращения в исходную точку;

2. Выявление необходимости разбиения объектов инспекции на отдельные кластеры. При необходимости выполнение такого разбиения (кластеризации);

3. Определение верхней границы времени, в течение которого автономный непилотируемый аппарат израсходует энергию аккумуляторов, и расстояния, которое он может за это время пройти. Вычисление времени, отводимого на исследование инспектируемых объектов, и корректирование соответствующих предельных значений времени и расстояния (13-14);

4. Определение числа необходимых автономных непилотируемых аппаратов и числа циклов (отрезков пути, которые автономные непилотируемые аппараты пройдут без подзарядки аккумуляторов), исходя из заданного времени, отведенного на инспекцию, а также числа зарядных устройств ( $K$ ) судна-базы;

5. Построение маршрутов отдельных автономных непилотируемых аппаратов по циклам в соответствии с (3-10).

Таким образом, в зависимости от топологии расположения объектов, целей оптимизации и имеющихся ресурсов могут быть использованы разные подходы к планированию работы группы АНПА с подвижного судна-базы.

#### Литература

1. *Бычков И.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н.* Двухуровневый эволюционный подход к маршрутизации группы подводных роботов в условиях периодической ротации состава // Труды СПИИРАН. 2019. – Т. 18. – № 2. – С. 267–301.
2. *Дружинин Ю.О., Соколов В.В.* Планирование работы группы автономных необитаемых подводных аппаратов, базирующихся на судне-носителе / Труды 15-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2022). – М.: ИПУ РАН, 2022. – С. 1249–1254.
3. *Алексеев А.О.* Минимаксная задача М коммивояжеров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1991. – Т. 31. – № 12. – С. 1899–1905.
4. *Зак Ю.А.* Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. Изд. стереотип. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. – 394 с.
5. *Гимади Э.Х., Истомин А.Н., Рыков И.А.* О задаче нескольких коммивояжеров с ограничениями на пропускные способности рёбер графа // Дискретный анализ и исследование операций. – 2013. – Т. 20. – № 5. – С. 13–30.
6. *Костюк Ю.Д., Пожидаев М.С.* Приближенные алгоритмы решения сбалансированной задачи к коммивояжеров // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2008. – №1(2). – С. 106–112.