

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ (АНПА), БАЗИРУЮЩИХСЯ НА СУДНЕ-НОСИТЕЛЕ

Дружинин Ю.О., Соколов В.В.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва,
Россия, г. Москва ул. Профсоюзная д. 65
ydruzhin@ipu.ru, sok@ipu.ru*

Аннотация: Предлагается методика расчета работ, проводимых в рамках мониторинга реки или водного бассейна группой АНПА в сопровождении судна-базы, основанная на двухуровневой модели. Приведены примеры мониторинга линейного объекта (трубопровода или кабеля (силового и информационного)) и произвольно расположенных точек инспекции.

Ключевые слова: мониторинг, распределенная управляющая система, статическое расписание, автономный необитаемый подводный аппарат

Введение

Распределенная система мониторинга реки или водного бассейна предполагает наличие не только развитой сети стационарных датчиков, но и использование подвижных роботизированных комплексов, периодически сканирующих протяженные участки. Такое сканирование может выполняться как беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), так и надводными и подводными роботизированными аппаратами. Целый ряд работ по мониторингу водного бассейна может быть выполнен подводными аппаратами.

В настоящее время при проведении разнообразных подводных работ осуществляется (и даже частично осуществился) переход от использования одиночных АНПА и ТНПА (автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов) к одновременному применению нескольких аппаратов такого рода, что сокращает время выполнения работ, но одновременно усложняет задачи планирования работы и управления данными автономными аппаратами.

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

В работе [1] предложен алгоритм двухуровневого планирования, причем на верхнем уровне планируются энергетические затраты, а на нижнем (его можно назвать топологическим) – оптимальные пути обхода АНПА инспектируемых объектов. Объяснение данного алгоритма даётся на примере циклического обхода (патрулирования, инспектирования) ограниченной акватории с периодической подзарядкой аккумуляторов АНПА на береговой базе, которая по умолчанию располагает неограниченными ресурсами для зарядки их аккумуляторов.

В данной работе предполагается, что база подвижная, и имеет ограниченный ресурс, как для своего передвижения, так и для подзарядки АНПА. Кроме того, сама инспекция носит линейный характер (обследование участка реки, узкости и т.д.).

В качестве примеров рассматриваются: 1) задача прослеживания трассы подводного линейного объекта (трубопровода, силового или информационного кабеля) и 2) инспекция предварительно размеченных точек.

1 Постановка задачи

Имеется судно-база, которое может быть само роботизированным объектом. Судно-база располагает ресурсами (запасом энергии) E_{Σ} для осуществления миссии:

$$E_{\Sigma} = E_1 + E_2, \quad (1)$$

где E_1 – запас энергии, используемой для движения судна-базы; E_2 – запас энергии, используемой для зарядки аккумуляторов АНПА или ТНПА. Если АНПА и ТНПА используют только электродвижение, то судно-база может быть оборудовано двигателем внутреннего сгорания. Двигатели внутреннего сгорания могут использоваться также для привода генераторов постоянного тока при зарядке аккумуляторов АНПА или ТНПА. Тогда задается запас топлива, необходимый судно-базе для движения по заданному маршруту и для генерации постоянного тока, достаточного для зарядки аккумуляторов всех АНПА и ТНПА в течение выполнения заданной миссии.

Судно-база оборудовано также K причалами, в которых осуществляется подзарядка N подвижных объектов (АНПА или ТНПА), каждый из которых имеет скорость v_i (м/с) при ёмкости аккумуляторов

A_i (А•час) Необходимо обследовать M пунктов (объектов). Продолжительность времени подводной работы i – го АНПА t_{imid} вычисляется через потребляемый подводным аппаратом ток I_{imid} .

$$t_{imid} = \frac{A_i}{I_{imid}} \quad (2)$$

$$I_{imid} = I_{ivmid} + I_{ismid} \quad (3)$$

где I_{ivmid} – средний ток, потребляемый ходовыми электродвигателями АНПА, представляющий собой функцию от скорости $v_i(t)$. I_{ismid} – средний ток, потребляемый вспомогательным и специальным оборудованием АНПА.

Целью оптимизации могут быть: 1) минимальное время выполнения миссии (T); 2) минимальные затраты энергии (E_T) при выполнении заданной миссии с целью охватить большее число объектов. В последнем случае время выполнения миссии (T) может увеличиться. Например, выбирается не кратчайший маршрут между объектами, а более длинный, но использующий попутное течение.

Выполняемая миссия может состоять из нескольких циклов, определяемых расходом энергии аккумуляторных батарей АНПА или ТНПА и заканчивающихся принятием подводного аппарата на судне-базе для возобновления запаса электроэнергии. Само движение предполагается в одном направлении (без возвращения в точку начала движения), что вместе с перемещением судна-базы в точку всплытия АНПА, позволяет уменьшить время возвращения АНПА на базу.

Время выполнения i – м АНПА полного цикла задачи в l – м цикле складывается из следующих времен:

$$t_i(l) = \sum_{m=1}^{M_i(l)} (t_{1im}(l) + t_{2im}(l)) + t_{3i}(l) + t_{4i}(l), \quad (4)$$

где

$t_{1im}(l)$ – время перехода i -го АНПА к m -у объекту в l -м цикле;

$t_{2im}(l)$ – время инспекции i -м АНПА m -го объекта в l -м цикле;

$t_{3i}(l)$ – время возвращения i -го АНПА на судно-базу в l -м цикле.

$t_{4i}(l)$ – время зарядки аккумуляторов i -го АНПА в l -м цикле;

$M_i(l)$ – число объектов, которые инспектируются i -м АНПА в l -м цикле

$$t_i(l) = t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l) + t_{4i}(l), \quad (5)$$

$$t_{1i}(l) = \sum_{m=1}^{M_i(l)} t_{1im}(l); \quad (6)$$

$$t_{2i}(l) = \sum_{m=1}^{M_i(l)} t_{2im}(l), \quad (7)$$

где

$t_{1i}(l)$ – суммарное время переходов i -го АНПА к объектам инспекции в l -м цикле;

$t_{2i}(l)$ – суммарное время инспекций i -м АНПА объектов в l -м цикле;

Цикл работы судна-базы синхронизирован с циклом работы АНПА, он описывается двумя параллельно протекающими процессами: переходом в точку встречи к АНПА, нуждающемуся в подзарядке аккумуляторов, и собственно зарядке аккумуляторов АНПА. При зарядке аккумуляторов АНПА судно-база остается неподвижной. Последнее, однако, не означает, что судно-база не расходует энергию, так как необходимо противостоять сносу из-за течения или ветра. Таким образом, время выполнения i -го цикла для судна-базы складывается из следующих времен:

$$t_i(l) = t_5(l) + t_6(l), \quad (8)$$

где $t_5(l)$ – время движения судна-базы до встречи с АНПА в l -м цикле, $t_6(l)$ – время пребывания судна-базы без движения в l -м цикле. При этом выполняются следующие условия:

$$t_5(l) \leq (t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l)), \quad (9)$$

т.е. судно-база может прийти в точку встречи с АНПА до его прихода, но не позже.

$$t_6(l) \geq t_{4i}(l), \quad (10)$$

т.е. судно-база возобновит движение не раньше, чем зарядит аккумуляторы АНПА.

При планировании верхнего (энергетического) уровня миссии мы исходим из того, что нам известны следующие характеристики каждого из предназначенных для участия в ней АНПА (предполагается, что все они однотипные): ёмкость аккумуляторов (A_i), средняя скорость (v_{imid}), средний потребляемый ток (I_{imid}), директивное время выполнения миссии (T), число (M) и координаты точек, в которых проводится инспекция.

Исходя из этих данных, определяем ориентировочное число АНПА или ТНПА (N) и число причалов судна-базы (K). (В общем случае $N \neq K$).

Время работы i -го АНПА получаем по формуле (2). Определим также расстояние s_d , которое может пройти i -й АНПА за t_{imid} при скорости v_{imid} :

$$s_d = t_{imid}v_{imid} \quad (11)$$

Определим ориентировочно протяженность пути s_{max} , который проходит через все M инспектируемых точек. Проверяем возможность выполнения данной миссии за один цикл при условии использования одного или нескольких одинаковых АНПА:

$$s_{max} < s_d i, \quad i \in (1, N), \quad (12)$$

где N – число АНПА на судне-базе. Если условие (12) не выполняется при $i = N$, то эта миссия может быть осуществлена за L циклов:

$$L = \frac{s_{max}}{s_d N} \quad (13)$$

Отсюда можно оценить время миссии, в течение которой каждый АНПА подзаряжается L раз:

$$T_e = L t_{imid} \quad (14)$$

Проведем планирование миссии на верхнем (энергетическом) уровне.

Составление расписания. Имеется судно-база и N АНПА. Требуется выполнить множество $N_2 = \{1, 2, \dots, M\}$ заданий (посетить объектов инспекции). Для каждого задания $i \in N_2$ определены длительность выполнения $p_i > 0$, время поступления задания $r_i \geq 0$, задан крайний директивный срок выполнения всех работ D . В нашем случае $D = T$. Прерывания при выполнении заданий запрещены. Для каждого требования $i \in N_2$ определяется момент начала выполнения S_i такой $S_i \geq r_i$, и момент окончания выполнения задания $C_i = S_i + p_i$. Необходимо построить допустимое расписание, при котором $T \geq T_e$, а все условия задачи соблюдены. В нашем случае $S_i = r_i$, а $p_i = t_i$ (то есть время, в течение которого в l -ом цикле выполняются все операции миссии i -го АНПА (выход в район выполнения задания, осмотр $M_{1i}(l)$ объектов, координаты которых известны, возвращение на судно-базу и подзарядка батарей для нового цикла).

Предварительно рассмотрим расписание для судна-базы и одного АНПА. С учетом (5) и (6) получаем следующее расписание.

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_1(l) = C_1(l-1), \text{ при } l > 1 \\ C_1(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) + t_{41}(l), \quad l \in (1, L) \\ S_b(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_b(l) = S_1(l) = C_1(l-1), \text{ при } l > 1 \\ C_b(l) = S_b(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) \end{array} \right. \quad (15)$$

где $S_1(l)$, $C_1(l)$ – начало и конец l -го цикла работы АНПА (движение и зарядка аккумуляторов), $S_b(l)$, $C_b(l)$ – начало и окончание движения судна-базы в l -ом цикле.

Для данного расписания характерно то, что инспекция ведётся с перерывами, так как инспекция прекращается на время подхода и отхода АНПА к месту инспекции, а также на время зарядки аккумуляторов в конце каждого цикла. Инспекцию можно вести непрерывно, если увеличить число АНПА и составить другое расписание.

2 Инспекция линейного протяженного объекта, представляемого вырожденным деревом без ветвей

АНПА могут использоваться для инспекции протяженных линейных объектов, таких как подводный трубопровод или подводный кабель (энергетический или информационный).

Число АНПА, используемых для решения этой задачи зависит от соотношения времени зарядки аккумуляторов АНПА $t_{4i}(l)$ и суммарным временем выполнения цикла АНПА $t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l)$.

Если выполняется условие:

$$t_{4i}(l) \leq (t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l)), \quad (16)$$

то на борту корабля-базы достаточно иметь два АНПА ($N = 2$) и один причал ($K = 1$). В этом случае получаем следующее расписание:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_1(l) = C_1(l - 1), \text{ при } l > 1 \\ C_1(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) + t_{41}(l) \\ S_2(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) \\ C_2(l) = S_2(l) + t_{12}(l) + t_{22}(l) + t_{32}(l) + t_{42}(l) \\ S_b(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_b(l) = C_b(l - 1), \text{ при } l > 1 \\ C_b(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) + t_{12}(l) + t_{22}(l) + t_{32}(l) \end{array} \right. \quad l \in (1, L) \quad (17)$$

Если выполняется условие

$$t_{4i}(l) > (t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l)), \quad (18)$$

то есть, если зарядка аккумуляторов АНПА осуществляется медленнее, чем они разряжаются в процессе работы, то число АНПА, необходимых для поддержания непрерывного режима инспекции, вычисляется как

$$N = \left\lceil \frac{t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l) + t_{4i}(l)}{t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l)} \right\rceil \quad (19)$$

Если вычисленное число необходимых для непрерывной работы АНПА не превышает числа зарядных устройств судна-базы:

$$N \leq K, \quad (20)$$

то в этом случае расписание принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_1(l) = C_1(l - 1), \text{ при } l > 1 \\ C_1(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) + t_{41}(l) \\ S_2(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) \\ C_2(l) = S_2(l) + t_{12}(l) + t_{22}(l) + t_{32}(l) + t_{42}(l) \\ \dots \\ S_N(l) = S_{N-1}(l) + t_{1N-1}(l) + t_{2N-1}(l) + t_{3N-1}(l) \\ C_N(j) = S_N(l) + t_{1N}(l) + t_{2N}(l) + t_{3N}(l) + t_{4N}(l) \\ S_b(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_b(l) = S_1(l), \text{ при } l > 1 \\ C_b(l) = C_N(l) \end{array} \right. \quad l \in (1, L) \quad (21)$$

3 Инспекция произвольно расположенных в пространстве объектов двумя или несколькими АНПА

Если необходимо в кратчайшие сроки проинспектировать множество объектов, расположенных в произвольном порядке, то возникает необходимость в параллельной работе нескольких АНПА. В случае, если необходимо обеспечить работу двух АНПА ($N = 2$) при одном зарядном устройстве судна-базы ($K = 1$), то расписание работы АНПА должно быть составлено так, чтобы в каждый момент времени работал хотя бы один АНПА. Это достигается тем, что второй АНПА начинает работу со сдвигом во времени, равном времени зарядки аккумуляторов первого АНПА:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_1(l) = C_1(l - 1), \text{ при } l > 1 \\ C_1(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) + t_{41}(l) \\ S_2(l) = S_1(l) + t_{41}(l) \\ C_2(l) = S_2(l) + t_{12}(l) + t_{22}(l) + t_{32}(l) + t_{42}(l) \\ S_b(l) = 0, \quad \text{при } l = 1 \\ S_b(l) = C_b(l - 1), \text{ при } l > 1 \\ C_b(l) = S_1(l) + t_{11}(l) + t_{21}(l) + t_{31}(l) \end{array} \right. \quad l \in (1, L) \quad (22)$$

При условии $t_{4i}(l) < (t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l))$ число работающих АНПА может достигать значения

$$N = \left\lceil \frac{t_{1i}(l) + t_{2i}(l) + t_{3i}(l) + t_{4i}(l)}{t_{4i}(l)} \right\rceil \quad (23)$$

При увеличении числа зарядных устройств до K число работающих АНПА может быть увеличено до KN .

4 Нижний уровень задачи и алгоритм ее решения

Мы получили расписание работы группы АНПА применительно к циклам заряда/разрядки аккумуляторов подводных аппаратов. Теперь на нижнем уровне следует определить конкретные маршруты АНПА, применительно к расписанию (22). Данная задача представляет собой вариант классической транспортной задачи или задачи N коммивояжеров [2-5] (в нашем случае N АНПА), отличающаяся тем, что 1) не происходит возврата в исходную точку движения; 2) в одном цикле заряда/разрядки аккумуляторов N АНПА обходят все $M_1(l)$ объектов инспекции по маршрутам равной длительности так, что каждый из этих объектов посещается только одним АНПА; 3) маршруты всех АНПА 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).

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

$$M = \sum_{l=1}^L M_1(l) \quad (24)$$

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:

$$z_0(l+1) = z_{M_1(l)+1}(l), \quad (25)$$

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 $z_{M_1+1}(l)$.

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:

$$M_1(l) = \max_{a_N \subset a} \sum_{n=1}^N \sum_{i,j=1}^{M_1(l)} x_{ij}, \quad (26)$$

При условиях:

$$\sum_{i,j=1}^{M_1(l)+1} c_{ij} x_{ij} < s_d, \text{ для каждого выбранного пути } a_n, n = 1, 2, \dots, N. \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^{M_1(l)} x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, M_1(l), i \neq j, \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^{M_1(l)} x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, M_1(l), j \neq i, \quad (29)$$

$$\sum_{j=0}^{M_1(l)+1} x_{0j} = N, \quad (30)$$

$$\sum_{i=0}^{M_1(l)+1} x_{i, M_1(l)+1} = N, \quad (31)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i, j \in a_n, n = 1, 2, \dots, N \\ 0 & \text{в противном случае,} \\ & i, j = 0, 1, \dots, M_1(l) + 1, i \neq j \end{cases} \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^{M_1(l)} \sum_{j=1}^{M_1(l)} x_{ij} + N = M_1(l) \quad (33)$$

Из условий (28) и (29) следует, что каждая точка инспекции посещается одним из N АНПА только один раз. Ограничения (30) и (31) определяют условия спуска и приема АНПА на борт судна-базы.

Условие (32) определяет переменные x_{ij} , соответствующие дугам i, j , входящим в путь $a_n, n = 1, 2, \dots, N$.

Условие (33) определяет, что все объекты цикла l посещены.

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

1. Получить координаты точек инспекции и вычислить минимальный путь их обхода без возвращения в исходную точку;
2. Определить верхнюю границу времени, в течение которого АНПА израсходует энергию аккумуляторов (2) и расстояние, которое он может за это время пройти (11);
3. Исходя из заданного времени, отведенного на инспекцию, а также числа зарядных устройств (K) судна-базы определить число потребных АНПА (N) и число циклов (отрезков пути, которые АНПА пройдут без подзарядки аккумуляторов);
4. Построить маршруты отдельных АНПА по циклам в соответствии с (26-33).

Заключение

Предложен алгоритм построения расписания обхода объектов инспекции, предусматривающий использование группы АНПА, перевозимых судном-базой. Этот алгоритм предусматривает перемещение судна-базы в точку, ближайшую к точкам конца маршрута в каждом цикле, что позволяет сократить время движения АНПА на перезарядку и к первому объекту инспекции в цикле.

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. *Зак Ю.А.* Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. Изд. стереотип. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. – 394 с.
3. *Алексеев А.О.* Минимаксная задача M коммивояжеров // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1991. Т. 31. № 12. С. 1899-1905.
4. *Костюк Ю.Л., Пожидаев М.С.* Приближенные алгоритмы решения сбалансированной задачи k коммивояжеров // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, 2008. Т. 2. № 1. С. 106-112.
5. *Мушуб В.А., Фомин Г.П.* Логистическая задача нескольких коммивояжеров // Знание. Serenity-Group (Харьков), 2016. № 10-2(39). С. 137-144.