

Планирование выполнения сложных полетных заданий группировками интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов*

В. Б. Мелехин[†], М. В. Хачумов[‡]

[†] Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Россия

[‡] Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Проведен сравнительный анализ параллельного и конвейерного способов выполнения сложных полетных заданий группировками интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов, позволяющий определять наиболее эффективный путь их реализации согласно критериям минимального времени и ограниченных функциональных возможностей бортовых ЭВМ. Предложена модель представления знаний безотносительно к конкретной предметной области, обеспечивающая возможность планирования целенаправленного поведения в условиях априори неописанной проблемной среды. Разработаны процедуры обработки знаний и вывода решений на семантических сетях, позволяющие планировать целенаправленное поведение интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов в процессе решения различных подзадач сложного полетного задания с полиномиальной сложностью.

Ключевые слова: группировка, беспилотные летательные аппараты, модель представления знаний, фреймы действий и отношений, активные семантические сети, вывод решения на семантических сетях.

DOI 10.14357/20718594190207

Введение

К одному из эффективных путей оперативного выполнения сложных полетных заданий (СПЗ) в труднодоступной для человека местности (проблемной среде-ПС) при ограниченном времени, относится использование группировок автономных беспилотных летательных аппаратов. В этом случае, если полетное задание предусматривает необходимость посадки и обработки определенных действий над находящимися на земле объектами, то для его выполнения требуется привлечение группировки автономных беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (АБЛА ВТ), оснащенных

манипулятором. В противном случае для выполнения полетного задания используются автономные беспилотные летательные аппараты самолетного типа (АБЛА СТ), например, для поиска и сопровождения групповой цели в агрессивной ПС и т.п.

Рассмотрим постановку решаемой задачи в общем виде. Пусть полетное задание реализуется на территории труднодоступной для человека местности, которую можно разбить на множество $M = \{m_{j_1}\}, j_1 = 1, 2, \dots, m_1$ автономных участков (пунктов назначения) с расположенными на них различными объектами $O = \{o_{j_2}\}, j_2 = 1, 2, \dots, m_2$. Согласно СПЗ, имеющиеся на различных участках объекты

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-11-00048).

Хачумов Михаил Вячеславович. E-mail: khmike@inbox.ru

$o_{j_2} \in O$, необходимо либо перевести из текущего в требуемое состояние $s_{Ц}^{j_2}$, либо изменить их местоположение в среде относительно друг друга при ограниченном времени решения поставленной задачи. Другими словами, требуется выполнить целенаправленное преобразование текущей ситуации среды при условии, что присутствующие в ней объекты могут находиться в одном из произвольных допустимых состояний $S_{j_2} = \{s_{i_1}^{j_2}\}, i_1 = 1, 2, \dots, n_{j_2}$, которые летательным аппаратам априори неизвестны.

Очевидно, что для выполнения заданного таким образом СПЗ при ограниченном времени его реализации требуется привлечение группировки интеллектуальных АБЛА ВТ. Входящие в группировку летательные аппараты должны обладать техническим зрением и другими интеллектуальными средствами, позволяющими автоматически формировать модель текущих ситуаций ПС, а затем выполнять на их основе необходимые целенаправленные преобразования путем отработки различных действий $B_{j_2} = \{b_{i_2}^j\}, i_2 = 1, 2, \dots, n_{j_3}$ для перевода объектов $o_{j_2} \in O$ из произвольного состояния $s_T^{j_2}$ в необходимое $s_{Ц}^{j_2}$ или для изменения их местоположения в среде.

Например, для проведения сейсмического мониторинга труднодоступной для человека горной местности, на территории которой расположены гидроэлектростанции или другие значимые объекты, возникает необходимость в рассредоточенной установке и дальнейшем обслуживании (смены аккумуляторов питания, замены регистрирующих элементов и т.д.) автономных регистраторов сейсмических сигналов. Эффективное решение данной или подобной ей задачи может быть выполнено группировкой АБЛА ВТ.

Для выполнения СПЗ в условиях неопределенности необходимо входящие в группировку АБЛА ВТ наделить возможностями решать следующие основные задачи:

- определять руководителем полета (специальным АБЛА ВТ или АБЛА СТ) способ разбиения полетного задания на подзадачи, решение которых закрепляется за отдельными автономными летательными аппаратами группировки и позволяет наиболее эффективным образом обеспечить

его выполнение с учетом имеющихся у бортовых систем управления функциональных ограничений бортовых систем управления;

- автоматически формировать формальное описание текущих ситуаций различных участков ПС, позволяющее интеллектуальным решателям задач летательных аппаратов планировать целенаправленное поведение, обеспечивающее эффективное решение стоящих перед ними подзадач СПЗ. Следует отметить, что учитывая ограниченные функциональные возможности интеллектуальных решателей задач АБЛА ВТ, текущие ситуации закрепленных за ними участков ПС для обеспечения оперативного автоматического построения и наглядности представления декларативных знаний, целесообразно формировать в виде семантических сетей.

Однако следует также отметить, что в настоящее время практически отсутствуют эффективные процедуры обработки декларативных знаний, представленных в виде семантических сетей, которые обеспечивают эффективное планирование целенаправленного поведения автономных интеллектуальных систем в различных условиях ПС [1]. В этой связи возникает необходимость в разработке модели представления процедурных знаний АБЛА ВТ, позволяющей автоматически планировать целенаправленное поведение автономных интеллектуальных систем в пространстве состояний на основе семантических сетей.

1. Основные способы выполнения полетных заданий группировкой беспилотных летательных аппаратов

При ограниченном времени выполнения сложного полетного задания T^* целесообразно создание группировок АБЛА ВТ или АБЛА СТ, которые могут оперативно решить поставленную перед ними задачу одним из следующих способов.

1. *Путем разбиения* сложного полетного задания на m_1 автономных подзадач с последующим закреплением каждой такой подзадачи за отдельным АБЛА ВТ или АБЛА СТ, входящим в группировку. Таким образом, группировка будет состоять из m_1 летательных аппаратов, за каждым из которых закрепляется один из пунктов назначения для решения связанной

с ним подзадачи общего полетного задания. Следовательно, например, каждому АБЛА ВТ необходимо выполнить перелет к закрепленному за ним участку ПС и перевести находящиеся на земле один или несколько объектов в требуемое состояние $S_{Ц}^{j_2}$.

Общее время выполнения полетного задания $T_{ПЗ}$ группировкой летательных аппаратов в этом случае будет определяться следующим образом:

$$T_{ПЗ} = \max_{j_1=1}^{m_1} (T_{j_1} + T_{j_1}^{ПЕР}),$$

где T_{j_1} – время решения подзадачи полетного задания в j_1 -ом пункте назначения; $T_{j_1}^{ПЕР}$ – время перелета от места текущего расположения к j_1 -му пункту назначения.

Следует отметить, что если выполняется условие $T_{ПЗ} < T^*$, то в этом случае возникает возможность включения в группировку такого минимального количества m^* летательных аппаратов, при котором выполняется условие $T_{ПЗ} \leq T^*$.

2. Путем создания группировки из m^{**} специализированных летательных аппаратов для выполнения полетного задания конвейерным способом, например, при выполнении условия $T_{ПЗ} \ll T^*$, с допустимыми задержками взлета во времени для обеспечения безопасного совместного полета летательных аппаратов [2]. В этом случае, за каждым летательным аппаратом группировки (например, состоящей из АБЛА ВТ) для достижения заданной общей цели $S_{Ц}^{j_2}$ закрепляется подзадача, связанная с необходимостью перевода объектов $o_{j_2} \in O$, расположенных в различных пунктах назначения $m_{j_1} \in M$, в одно из требуемых состояний $S_{i_1}^{j_2} \in S_{j_2}$.

Количество m^{**} , входящих в этом случае в группировку летательных аппаратов, будет определяться числом подзадач, на которые разбивается полетное задание для его выполнения конвейерным способом. Как правило, в этом случае справедливым является условие $m^{**} < m_1$, т.е. количество летательных аппаратов, входящих в группировку, меньше количества автономных участков ПС. Следовательно,

каждому летательному аппарату необходимо облететь все m_1 пункты назначения, на каждом из которых он решает закрепленную за ними одну и ту же подзадачу полетного задания.

Отсюда, максимальное время $T_{ПЗ}^{i_3}(\max)$ выполнения полетного задания i_3 отдельным летательным аппаратом в процессе его реализации конвейерным способом будет определяться следующим образом:

$$T_{ПЗ}^{i_3}(\max) = T_{ОЖ}^{i_3}(\max) + T_{ОБЛ} + m_1 \max_{i_3}^{m_1} T_{j_1}^{i_3},$$

$$i_3 = 1, 2, \dots, m^{**}$$

где $T_{ОЖ}^{i_3}(\max)$ – максимальное время ожидания взлета i_3 летательным аппаратом для безопасного полета, т.е. во избежание встречи с $i_3 - 1$ летательным аппаратом в одном и том же пункте назначения; $T_{ОБЛ}$ – время облета всех пунктов назначения по заданному маршруту одним беспилотным летательным аппаратом; $T_{j_1}^{i_3}$ – время выполнения i_3 летательным аппаратом закрепленной за ним подзадачи полетного задания.

Необходимость определения задержек во времени $T_{ПЗ}^{i_3}$ для безопасного полета возникает в том случае, когда время перелета к пункту назначения i_3 летательного аппарата меньше времени перелета и решения подзадачи, закрепленной за $i_3 - 1$ летательным аппаратом на предыдущем этапе выполнения полетного задания.

Учитывая, что для всех беспилотных летательных аппаратов время облета различных пунктов назначения $T_{ОБЛ}$ практически является одинаковым, время ожидания взлета каждым из них, например, i_3 можно вычислить следующим образом:

$$T_{ОЖ}^{i_3} = \sum_{i_3}^{m^{**}-1-i_3} T_1^{i_3}(\max),$$

где $T_1^{i_3}(\max)$ – максимальное время решения подзадачи i_3 летательным аппаратом в первом пункте назначения, например, для АБЛА ВТ это время зависит от текущего состояния находящихся в нем объектов.

Отсюда, общее время выполнения полетного задания $T_{ПЗ}^*$ группировкой летательных аппара-

тов конвейерным способом с учетом того, что согласно условию $m^{**} < m_1$, все беспилотные летательные аппараты группировки могут одновременно находиться в воздухе, будет определяться временем решения подзадачи, стоящей перед последним $i_3 = m^{**}$ летательным аппаратом:

$$T_{ПЗ}^* = T_{ОЖ}^{m^{**}} + \sum_{j_1}^{m_1} (T_{ОБЛ} + \sum_{i_3}^{m^{**}} T_{j_1}^{i_3}).$$

Следовательно, если, например, для каждого АБЛА ВТ определить упорядоченную последовательность всех необходимых промежуточных состояний различных объектов, связанных с достижением цели $S_{Ц}^{j_2}$, то это позволяет ему после подлета к заданному объекту принять следующее решение:

«Если объект находится в закрепленном за АБЛА ВТ состоянии или в другом допустимом состоянии, стоящим в заданной последовательности справа от закрепленного за ним состояния, то ему следует перелететь к следующему пункту назначения. В противном случае, приступить к решению закрепленной за ним подзадачи полетного задания».

Таким образом, облет всех пунктов назначения осуществляется каждым отдельным летательным аппаратом последовательно во времени, до тех пор, пока он не выполнит закрепленную за ним подзадачу полетного задания на последнем пункте. Следовательно, при конвейерном способе выполнения полетного задания перед каждым автономно действующим летательным аппаратом возникает необходимость в решении следующих вспомогательных подзадач:

- планирования облета пунктов назначения (участков ПС) по оптимальной согласно заданному критерию траектории (например, минимальной по времени или минимальной по энергетическим затратам траектории полета) с учетом действующих в воздушной среде и на земле возмущений, например, ветра и т.д.;

- планирования локально-оптимального маршрута подлета к текущей цели в зоне ее прямой видимости априори неописанной ПС с препятствиями.

Следует отметить, что все траектории облета целей в процессе конвейерного способа выполнения полетного задания для различных летательных аппаратов фактически являются

одними и теми же. Другими словами, оптимальную траекторию облета пунктов назначения с учетом возмущений ПС достаточно построить первому летательному аппарату.

3. Необходимость в создании и привлечении группировки летательных аппаратов для выполнения сложного полетного задания возникает и в следующем случае. Допустим, полетное задание выполняется отдельным беспилотным летательным аппаратом в заданном пункте назначения в неопределенных условиях ПС. Однако при попытке его реализации выясняется, что беспилотный летательный аппарат в силу ограниченных функциональных возможностей, например, при недостаточной грузоподъемности не способен самостоятельно захватить объект, взлететь с ним и поменять его местоположение, или, например, при разделении групповой цели наблюдаемой отдельным АБЛА СТ, он не способен сопровождать все возникшие таким образом подцели и т.п. Следовательно, для решения таких или аналогичных им подзадач полетного задания требуется привлечение дополнительных летательных аппаратов путем создания необходимой для их эффективного выполнения группировки.

Однако выполнение сложных полетных заданий группировкой беспилотных летательных аппаратов при такой постановке задачи требует отдельного обсуждения, так как в этом случае возникает необходимость в решении проблем, связанных с безопасным совместным полетом и взаимодействием, т.е. с учетом допустимых расстояний между беспилотными летательными аппаратами, находящимися в воздухе на близком расстоянии друг от друга. В первую очередь, в данном случае требуется решить проблемы безопасного взлета, а также формирования и поддержания безопасного строя летательных аппаратов в совместном полете. Например, когда в условиях пожара перед несколькими АБЛА ВТ в процессе выполнения спасательных работ возникает необходимость в поднятии в воздух тяжелого для одного летательного аппарата объекта для смены его местоположения в ПС.

Сравнивая между собой предложенные выше способы реализации сложных полетных заданий группировками беспилотных летательных аппаратов различного назначения необходимо иметь в виду следующее. Для выполнения группировкой автономных бесплот-

ных летательных аппаратов сложных полетных заданий требуется использование инструментальных средств искусственного интеллекта, обеспечивающих возможность автоматического целенаправленного планирования поведения в различных по сложности, априори неопределенных, ПС. Это, в свою очередь, приводит к необходимости оснащения системы автоматического управления целенаправленного поведения АБЛА ВТ или АБЛА СТ вычислительным устройством, позволяющим эффективным образом реализовать интеллектуальный решатель задач при условии достаточно высоких ограничений связанных с относительно низкой производительностью бортовых ЭВМ [3, 4]. В этой связи, применение моделей представления и обработки знаний, которые используются в современных интеллектуальных системах управления различными объектами [5-10], в силу их высокой сложности, является неприемлемым, так как для их реализации требуются высокопроизводительные ЭВМ [6, 7].

Таким образом, согласно обозначенным выше ограничениям по времени и вычислительной мощности бортовых ЭВМ, при выборе наиболее эффективного способа выполнения сложного полетного задания группировкой беспилотных летательных аппаратов, следует исходить из следующих соображений.

С одной стороны, очевидно, что время реализации полетного задания $T_{ПЗ}$ группировкой беспилотных летательных аппаратов, в первом случае намного меньше времени $T_{ПЗ}^*$ решения этой же задачи конвейерным способом. Следовательно, при высоких требованиях к минимальному времени выполнения полетного задания, например, в условиях пожара, возникает необходимость в разработке таких моделей представления и обработки знаний, которые позволяют решать задачи планирования целенаправленного поведения с полиномиальной сложностью, например, второго порядка от числа типовых элементов представления знаний беспилотных летательных аппаратов. Другими словами, исходя из ограничений, определяемых относительно низкой производительностью бортовых ЭВМ, требуется построение обобщенной модели представления и обработки знаний с учетом функционального назначения автономных беспилотных летательных аппаратов и обрабатываемых ими дей-

ствий. Это позволяет реализовать преимущество по времени параллельного способа выполнения сложного полетного задания, предусматривающего его разбиение на автономные подзадачи и их закрепление для одновременного решения за отдельными летательными аппаратами группировки, в сравнении с конвейерным способом его реализации.

С другой стороны, при использовании первого способа выполнения полетного задания перед беспилотными летательными аппаратами, очевидно, возникает необходимость в решении более сложных задач планирования поведения, чем задачи, решаемые узкоспециализированными летательными аппаратами при конвейерном способе его реализации. Таким образом, с точки зрения ограничений по производительности бортовых ЭВМ, конвейерный способ выполнения группировкой автономных беспилотных летательных аппаратов сложных полетных заданий, при условии невысоких требований ко времени, является более экономичным. Кроме того, как правило, количество летательных аппаратов, входящих в группировку, во втором случае, меньше их количества, необходимого для выполнения подзадач полетного задания параллельным способом.

2. Модель представления знаний интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов

Модель представления процедурных знаний АБЛА ВТ и АБЛА СТ целесообразно сформировать безотносительно к конкретной предметной области. Для этого можно использовать следующие три вида типовых элементов, содержание которых определяется исходя из функционального назначения автономных беспилотных летательных аппаратов.

1. Обобщенное фреймподобное описание элементарных и сложных действий (состоящих из нескольких простых операций) или фреймов действий (ФД), имеющих следующую структуру:

«Условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки действия $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$ ФД» < последовательность операций связанных с реализацией действия $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$ > < результат отработки действия $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$ >».

2. Фреймоподобное описание различных отношений или фреймов отношений (ФО) $D = \{d_{j_3}\}, j_3 = 1, 2, \dots, m_3$, которые определяют изменение их значений в результате обрабатываемых, например АБЛА ВТ, действий и имеют следующую структуру:

«<Идентификатор или вид отношения $d_{j_3} \in D$ ><действие, $b_{i_2}^j(+)$ $\in B_{j_2}$ позволяющее увеличить значение отношения $d_{j_3} \in D$ между объектами ПС или объектом ПС и летательным аппаратом><действие, $b_{i_2}^j(-)$ $\in B_{j_2}$ позволяющее уменьшить значение отношения $d_{j_3} \in D$ между объектами ПС или объектом ПС и летательным аппаратом>».

Например, для отношения «<Расстояние между объектами ПС o_{j_2} и $o_{j_2}^*$ ><увеличить расстояние: захватить объект o_{j_2} и отлететь с ним на требуемое расстояние от объекта $o_{j_2}^*$ ><уменьшить расстояние: захватить объект o_{j_2} и подлететь с ним на необходимое расстояние к объекту $o_{j_2}^*$ >»

3. Закономерности перевода объектов ПС $o_{j_2} \in O$ из одного состояния в другое в результате обрабатываемых АБЛА ВТ или АБЛА СТ действий $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$, имеют следующую структуру:

«< $s_{i_1}^{j_2} \in S_{j_2}$ – текущее состояние объекта ПС $o_{j_2} \in O$ ><обрабатываемое летательным аппаратом действие $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$ >< $s_{i_1}^{*j_2} \in S_{j_2}$ результирующее состояние объекта ПС $o_{j_2} \in O$ >».

Следует отметить, что если, например, летательному аппарату априори неизвестны закономерности преобразования состояний объектов $o_{j_2} \in O$, то их выявление может осуществляться автоматически на основе алгоритмов самообучения, приведенных в [11].

Различные объекты ПС $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ целесообразно определить множеством минимально необходимых для идентификации и манипулирования ими характеристик X_{j_2} .

Уточним формальное представление текущих ситуаций ПС, которое автоматически формируется АБЛА ВТ в процессе планирова-

ния целенаправленного поведения. Оно определяется в форме пассивных семантических сетей (ПСС), имеющих следующее теоретико-множественное описание:

$$G = (v_0, V, E),$$

где v_0 - ключевая вершина или вершина, помеченная летательным аппаратом, относительно местоположения которого строится ПСС; $V = \{v_{j_4}(o_{j_2}(X_{j_2}))\}, j_4 = 1, 2, \dots, m_4$ - множество вершин помеченных наблюдаемыми в ПС объектами $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$;

$E = \{e_{j_5}(l_{j_5})\}, j_5 = 1, 2, \dots, m_5$ - множество ребер ПСС, определяемых количественными значениями l_{j_5} отношений пространства состояний, которые складываются в текущих условиях ПС между объектами ПС и летательным аппаратом (расстояниями между объектами и расположением объектов относительно друг друга по высоте и т.д.).

Для представления ФД безотносительно к конкретной предметной области условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки соответствующих им действий $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$, целесообразно представить в виде активной семантической сети (АСС):

$$G_{AC}(i_2) = (v_0, V_{AC}(i_2), E_{AC}(i_2)),$$

где $V_{AC}(i_2) = \{v_{j_6}(X_{j_6})\}, j_6 = 1, 2, \dots, m_6$ - множество активных вершин, каждая из которых определяется множеством характеристик X_{j_6} , которыми должны обладать объекты ПС $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ для того, чтобы была допустима их пометка этими объектами, например, активная вершина $v_{j_6}(X_{j_6}) \in V_{AC}(i_2)$ может быть помечена объектом ПС $o_{j_2}(X_{j_2})$, если выполняется условие $X_{j_5} \subseteq X_{j_2}$;

$E_{AC}(i_2) = \{e_{j_7}(a_{i_2} - a_{i_2}^*)\}, j_7 = 1, 2, \dots, m_6$ - множество ребер, которые помечаются интервальными значениями отношений пространства состояний с нижней a_{i_2} и верхней $a_{i_2}^*$ границей, которые определяют условия для успешной отработки действия ФД $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$ в ПС согласно функциональным возможностям летательных аппаратов.

Например, объект ПС $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ может быть захвачен рабочим органом манипулятора АБЛА ВТ, если:

– для расстояния l между летательным аппаратом и объектом $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ в фактической ситуации ПС выполняется условие $a_{i_2} \leq l \leq a_{i_2}^*$, где граничные значения a_{i_2} и $a_{i_2}^*$ требуемого в этом случае расстояния определяются рабочей зоной манипулятора АКМ. Следует иметь в виду, что если данное условие не выполняется, то между ПСС, определяющей текущую ситуацию ПС и АСС, соответствующей ФД, имеется как минимум одно различие, которое необходимо устранить для успешной отработки этого действия;

– объект $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ имеет вес и габаритные размеры, соответственно не превышающие грузоподъемность летательного аппарата и размеры захвата рабочего органа его манипулятора.

Результат отработки действия $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$ в структуре ФД определяется АСС $G_p(i_2)$, вершины которой помечаются объектами ПС, над которыми выполнялось данное действие. Ребра такой семантической сети определяются конкретными значениями отношений между данными объектами, которые получаются в результате отработки в ПС соответствующего ФД действия.

3. Процедуры планирования поведения интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов

Характер деятельности и процедуры обработки знаний в процессе планирования целенаправленного поведения отдельными интеллектуальными летательными аппаратами, входящими в группировку при выполнении заданной им подзадачи сложного полетного задания, определяются содержанием цели поведения, которое может быть следующим.

1. Процедурным или представленным в виде вспомогательных подзадач и одного или нескольких сложных действий $b_{i_2}^j \in B_{j_2}$, входящих в структуру заданных ФД.

2. Процедурно-декларативным в виде вспомогательных подзадач и АСС G_{II} , активные

вершины которой, позволяют определить необходимые на заданном участке объекты ПС, а отношения, которыми помечены ребра, расположить данные объекты относительно друг друга в заданном порядке, обеспечивающем достижение цели. Другим словами, в этом случае согласно заданной, например, АБЛА ВТ цели ему требуется перелететь к указанному в ней пункту назначения и выполнить необходимые преобразования текущей ситуации ПС. Например, когда согласно полетному заданию необходимо изменить местоположение различных объектов $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ относительно друг друга в определенном квадрате местности в соответствии с заданными в семантической сети G_{II} отношениями между ними.

Таким образом, полетное задание группировки беспилотных летательных аппаратов можно разделить на две фазы: «пассивную» и «активную».

На пассивной фазе выполнение полетного задания связано с перелетом к заданному пункту назначения и подлету к целям, т.е. с решением вспомогательных подзадач. Следует отметить, что в качестве процедур планирования траектории облета всех пунктов назначения, можно использовать алгоритмы, исследованные в [12], а в качестве алгоритмов подлета к различным подцелям ПС с опасными зонами, целесообразно использовать алгоритмы, рассмотренные в [13].

На активной фазе выполнения полетного задания планирование целенаправленного поведения интеллектуальным летательным аппаратом на каждом его шаге опирается на вывод путем сравнения между собой семантических сетей для проверки условий, которые должны выполняться в текущей ситуации ПС для успешной отработки выбираемых им действий.

Например, пусть АБЛА ВТ согласно заданной в процедурном виде цели необходимо поставить объект $o_{j_2}(X_{j_2})$ на объект $o_{j_2}^*(X_{j_2}^*)$ в текущей ситуации ПС, определяемой ПСС $G = (v_0, V, E)$. Заданная таким образом цель поведения позволяет ему определить ФД «<АСС $G_{ИС}(i_2)$ >< $b_{i_2}^j$ ><ПСС $G_p(i_2)$ >», обеспечивающий ее достижение путем отработки входящего в его структуру действия $b_{i_2}^j$.

В этом случае действие $b_{i_2}^j$ будет результативным в текущих условиях ПС, если АСС $G_{ИС}(i_2)$ является вложено изоморфной в ПСС $G = (v_0, V, E)$ с точностью до равенства пометок одинаково расположенных в их структуре вершин и ребер. В противном случае в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и G между значениями одноименных отношений имеется как минимум одно различие, которое необходимо устранить для успешной отработки действия $b_{i_2}^j$ в текущих условиях ПС.

Определение. Активная семантическая сеть $G_{ИС}(i_2)$ является вложено изоморфной в ПСС $G = (v_0, V, E)$, если выполняются следующие условия:

1)

$$\forall v_{j_5}(X_{j_5}) \in V_{ИС}(i_2) \exists v_{j_4}(o_{j_2}(X_{j_2})) \in V[X_{j_5} \subseteq X_{j_2}];$$

2)

$$\forall e_{j_7}(a_{i_2} - a_{i_2}^*) \in E_{ИС}(i_2) \exists e_{j_3}(l_{j_3}) [a_{i_2} \leq l_{j_3} \leq a_{i_2}^*],$$

где сравниваемые между собой вершины $v_{j_5}(X_{j_5}), v_{j_4}(o_{j_2}(X_{j_2}))$ и инцидентные им ребра $e_{j_7}(a_{i_2} - a_{i_2}^*), e_{j_3}(l_{j_3})$ имеют одинаковое положение соответственно в структуре сетей $G_{ИС}(i_2)$ и G . Кроме того, вершины $v_{j_5}(X_{j_5})$ и $v_{j_4}(o_{j_2}(X_{j_2}))$ являются смежными вершинам v_0 соответственно в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и G .

Другими словами, сеть $G_{ИС}(i_2)$ является вложено изоморфной в сеть G , если выполняется условие $G_{ИС}(i_2) \cap G = G^*, G^* = G_{ИС}(i_2)$, где в сети G^* вершины помечены следующими характеристиками $\min(|X_{j_5}|, |X_{j_2}|)$, а ребра – значениями отношений $\max(l_{j_3}, a_{i_2}^*)$, где, например, $|X_{j_5}|$ – мощность множества X_{j_5} .

Утверждение 1. Функциональная сложность β_1 оценки вложенного изоморфизма АСС $G_{ИС}(i_2)$ в ПСС $G = (v_0, V, E)$ в худшем случае определяется следующим выражением:

$$\beta_1 \leq \sum_{j_8=1}^{m_8} m_{j_5}(j_8) m_{j_5}^*(j_8) + 2m_9,$$

где m_8 – количество пар сравниваемых между собой одноименных вершин в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и

$G = (v_0, V, E)$; $m_{j_5}(j_8), m_{j_5}^*(j_8)$ – соответственно мощности сравниваемых между собой множеств характеристик X_{j_5} и X_{j_2} , образующих j_8 пару одноименных вершин в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и $G = (v_0, V, E)$, для оценки выполнения условия $X_{j_5} \subseteq X_{j_2}$; m_9 – количество сравниваемых между собой одноименных ребер в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и $G = (v_0, V, E)$.

Доказательство. 1. Примем в качестве условной единицы для оценки функциональной сложности определения изоморфного вложения сети $G_{ИС}(i_2)$ в сеть $G = (v_0, V, E)$ одно сравнение между собой двух пометок вершин и ребер в сравниваемых семантических сетях.

2. При сравнении характеристик X_{j_5} и X_{j_2} , которыми помечены одинаковые вершины в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и $G = (v_0, V, E)$, с целью проверки выполнения условия $X_{j_5} \subseteq X_{j_2}$ каждый элемент множества X_{j_5} в общем случае сравнивается со всеми элементами множества X_{j_2} . Отсюда, если сеть $G_{ИС}(i_2)$ содержит m_8 вершин, то общее количество сравнений пометок вершин в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и $G = (v_0, V, E)$ в худшем случае будет определяться следующим образом: $\sum_{j_8=1}^{m_8} m_{j_5}(j_8) m_{j_5}^*(j_8)$. В лучшем случае может выполняться одно сравнение.

3. Каждая пометка ребра в сети $G_{ИС}(i_2)$ определяется интервальным значением соответствующего ей отношения с граничными значениями $a_{i_2} - a_{i_2}^*$. Следовательно, для оценки идентичности пометок одноименных ребер в сетях $G_{ИС}(i_2)$ и $G = (v_0, V, E)$ для проверки выполнения условия $a_{i_2} \leq l_{j_3} \leq a_{i_2}^*$ осуществляется два сравнения.

4. Из пп. 1-3 с очевидностью следует справедливость доказываемого утверждения.

Рассмотрим процедуры планирования целенаправленной деятельности АБЛА ВТ и АБЛА СТ в «активной» фазе выполнения полетного задания с использованием предложенной модели представления знаний для случая, когда

подцель поведения задана в процедурной форме представления.

Начало. 1. Определить по заданной в процедурной форме подцели поведения биективно соответствующий ей ФД₁ «<АСС $G_{ИС}(1)$ >< b_1^j ><ПСС $G_P(1)$ >>».

2. С помощью информационно-измерительной системы сформировать пассивную семантическую сеть $G = (v_0, V, E)$, определяющую текущее состояние объектов ПС, расположенных в заданном пункте назначения.

3. Проверить условие «АСС $G_{ИС}(1)$ является вложено изоморфной в ПСС $G = (v_0, V, E)$ »: если условие выполняется, то перейти к п. 4; в противном случае, перейти к п. 5.

4. Для достижения заданной подцели поведения отработать действие b_1^j , перейти к п. 15.

5. Сравнивая значения одноименных отношений в сетях $G_{ИС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$, определить имеющиеся между ними различия.

6. Сформировать кортеж R_1 , ранжировав выявленные различия в порядке их устранения. (Как правило, порядок устранения различий между сетями $G_{ИС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$ априори определяется в ФД путем соответствующей разметки ребер в сети $G_{ИС}(1)$).

7. Выбрать в сформированном кортеже различий R_1 первый, находящийся в нем элемент. Удалить из кортежа выбранный элемент. Выбрать ФО по содержанию отношения, соответствующего выбранному различию. Определить знак изменения отношения (увеличить или уменьшить) для устранения соответствующего различия между семантическими сетями $G_{ИС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$.

8. По выявленному ФО и знаку изменения значения отношения определить действие b_2^j , позволяющее устранить данное различие.

9. По содержанию выявленного действия b_2^j выбрать соответствующий ему ФД₂ «<АСС $G_{ИС}(2)$ >< b_2^j ><ПСС $G_P(2)$ >>».

10. Проверить условие «АСС $G_{ИС}(2)$ является вложено изоморфной в ПСС $G = (v_0, V, E)$ »: если условие выполняется, то перейти к п. 11; в противном случае, сформировать

кортеж R_2 имеющихся между семантическими сетями $G_{ИС}(2)$ и $G = (v_0, V, E)$ различий, перейти к п. 14.

11. Проверить условие $R_1 = \emptyset$: если условие выполняется, перейти к п. 12, в противном случае – к п.13.

12. Для достижения заданной подцели поведения отработать последовательность действий $b_2^j \rightarrow b_1^j$, перейти к п. 15.

13. Выбрать в сформированном кортеже различий R_1 первый, находящийся в нем элемент. Удалить из кортежа выбранный элемент. Выбрать ФО по содержанию отношения соответствующего выбранному различию. Определить знак изменения отношения (увеличить или уменьшить) для устранения соответствующего различия между семантическими сетями $G_{ИС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$ и т.д., пока не будет выявлена по вышеописанному принципу последовательность действий, позволяющая устранить все различия между сетями $G_{ИС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$ для успешной отработки действия b_1^j , перейти к п. 15.

14. Сформировать по вышеописанному принципу последовательность действий, позволяющую устранить все различия между семантическими сетями $G_{ИС}(2)$ и $G = (v_0, V, E)$, обозначенные в кортеже R_2 и т.д. пока не будут сформированы последовательности действий, позволяющие устранить все имеющиеся между сетями $G_{ИС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$ различия для успешной отработки действия b_1^j .

15. **Конец.**

Таким образом, на основе предложенного алгоритма планирования поведения, интеллектуальный беспилотный летательный аппарат автоматически формирует в пространстве подзадач дерево достижения цели с корневой вершиной, помеченной действием b_1^j , и висячими вершинами, помеченными действиями, которые он может непосредственно отработать в текущих условиях ПС, определяемых ПСС $G = (v_0, V, E)$. Действия соответствующие каждой ветви данного дерева позволяют устранить одно из различий между семантическими сетями $G_{ИС}(1)$ и

$G = (v_0, V, E)$ и, таким образом, обеспечить условия в ПС для успешной отработки действия $b_{i_2}^1$, определяющего достижение заданной в процедурной форме беспилотному летательному аппарату цели поведения.

Необходимо отметить, что характерной особенностью предложенной модели представления знаний и алгоритма планирования поведения является то, что в формируемом на их основе дереве решений, определяющем план целенаправленной деятельности интеллектуального беспилотного летательного аппарата, не образуются в процессе планирования пустые ветви и действия, не связанные с достижением цели.

Можно сформулировать и доказать следующее утверждение.

Утверждение 2. Функциональная сложность β_2 построения плана целенаправленного поведения на основе предложенной модели представления знаний и алгоритма планирования, в худшем случае, определяется следующим выражением:

$$\beta_2 \leq \sum_{j_9}^{m_9} \beta_1(j_9) = \sum_{j_9=1}^{m_9} \sum_{j_5=1}^{m_5^8} m_{j_5}(j_9) m_{j_5}^*(j_9) + 2 \sum_{j_9=1}^{m_9} n_{j_9},$$

где $\beta_1(j_9)$ - количество сравниваемых между собой пометок вершин ребер в сетях $G_{ПС}(1)$ и $G = (v_0, V, E)$ на j_9 шаге планирования поведения; m_9 - количество шагов планирования поведения.

Доказательство. Справедливость Утверждения 2 с очевидностью вытекает из доказанного выше Утверждения 1. Это обусловлено тем, что в основе выбора результативных действий $b_{i_2}^j$ на каждом j шаге планирования поведения лежит проверка выполнимости условия изоморфного вложения АСС $G_{ПС}(1)$ в ПСС $G = (v_0, V, E)$, определяющую исходную ситуацию ПС.

Таким образом, предложенная модель представления знаний и процедуры вывода обеспечивают интеллектуальным беспилотным летательным аппаратам возможность решения различных подзадач полетного задания с полиномиальной сложностью порядка $O[m^2]$, где m - размерность сравниваемых между собой семантических сетей в процессе планирования целенаправленного поведения.

Рассмотрим случай, когда цель поведения АБЛА ВТ или АБЛА СТ для выполнения полетного задания определяется в процедурно-декларативной форме. Таким образом, в этом случае требуется сформировать план целенаправленного поведения, позволяющий устранить все различия между АСС $G_{Ц} = (v_0, V_{Ц}, E_{Ц})$, определяющей цель поведения летательного аппарата и ПСС $G = (v_0, V, E)$ характеризующей текущую ситуацию ПС, где $V_{Ц}$ - множество активных вершин, по которым летательному аппарату требуется найти необходимые для достижения цели объекты ПС; $E_{Ц}$ - множество ребер, определяющих отношения, которые летательному аппарату необходимо обеспечить между данными объектами на заданном ему участке ПС.

Следует отметить, что если в АСС $G_{Ц} = (v_0, V_{Ц}, E_{Ц})$ обозначить порядок устранения предполагаемых различий с ПСС $G = (v_0, V, E)$, то для их устранения план целенаправленного поведения интеллектуального летательного аппарата можно сформировать на основе приведенного выше алгоритма планирования путем последовательного определения целенаправленных действий в следующем порядке:

$$\Phi O_1 \otimes \Phi D_1 \rightarrow \Phi O_2 \otimes \Phi D_2 \rightarrow \dots \Phi O_i \otimes \Phi D_i \rightarrow \dots \rightarrow \Phi O_n \otimes \Phi D_n \rightarrow G_{Ц},$$

где ΦO_1 - фрейм отношений, выбранный по первому предполагаемому различию, обозначенному в АСС $G_{Ц} = (v_0, V_{Ц}, E_{Ц})$; \otimes - операция, означающая выбор, например, по содержанию отношения ΦO_i такого ΦD_i , действие которого позволяет изменить необходимым образом значение данного отношения в ПСС $G = (v_0, V, E)$.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать следующие основные выводы.

1. Проведенный сравнительный анализ параллельного и конвейерного способов выполнения сложных полетных заданий группировкой интеллектуальных АБЛА ВТ и АБЛА СТ позволяет определить наиболее эффективный способ их реализации с учетом ограничений по времени и функциональных возможностей бортовых ЭВМ.

2. Предложенная модель представления знаний интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов безотносительно к конкретной предметной области позволяет им решать сложные задачи, в том числе подзадачи, связанные с манипулированием объектами ПС, в неопределенных условиях функционирования.

3. Важной особенностью предложенной модели процедурного представления знаний АБЛА ВТ, имеющей существенное теоретическое значение для развития автономных интеллектуальных систем, является возможность организации вывода решений в процессе планирования целенаправленного поведения на семантических сетях.

4. Разработанные процедуры обработки знаний в процессе планирования целенаправленного поведения обеспечивают возможность интеллектуальным беспилотным летательным аппаратам решать различные подзадачи полетного задания с полиномиальной сложностью. Это, в свою очередь, позволяет создавать специализированные АБЛА ВТ и АБЛА СТ, обладающие высокими функциональными возможностями, позволяющими им решать практические задачи в труднодоступных и агрессивных для человека проблемных средах.

Литература

1. Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. Руководство. М.: Диалектика / Вильямс. 2015. 1408 с.
2. Андрейчук А.А. Алгоритм планирования и согласования совокупности траекторий для группы интеллектуальных агентов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. № 4. С.72-85.
3. Рондан У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты. Теория и практика. М.: Техносфера. 2015. 312 с.
4. Абросимов В.К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. М.: Наука. 2017. 304 с.
5. Kilani Y., Bsoul M., Alsarhan A., Al-Khasawneh A. A Survey of the Satisfiability-Problems Solving Algorithms. // Intern. J. Advanced Intelligence Paradigms. 2013. №3. V.5. P. 233–256.
6. Люггер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. 4-е изд. М.: Вильямс. 2005. 863 с.
7. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge: Cambridge University Press. 2013. 808 p.
8. Вагин В.Н., Деревенко А.В. Кутепов В.П. Алгоритмы параллельного логического вывода и исследование их эффективности на компьютерных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. №1. С.3-9.
9. Kober J., Peters J. Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments. Cham: Springer. 2014. 201 p.
10. Осипов Г.С. Лекции по искусственному интеллекту. М.: Либерком, 2014. 272 с.
11. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. М.: Энергоатомиздат. 1994. 240 с.
12. Хачумов М.В. Планирование и моделирование траектории движения летательного аппарата в сложных условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. 2018. №1. С. 3-11.
13. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование маршрута целенаправленного полета автономного летательного аппарата на низкой высоте в условиях неопределенности // Авиакосмическое приборостроение. 2018. №1. С. 18-27.

Planning complex flight missions for a group of intelligent unmanned aerial vehicles

V. B. Melekhin¹, M. V. Khachumov^{II}

^IDagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

^{II}Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Moscow, Russia

Abstract. A comparative analysis of parallel and pipeline methods of performing complex flight missions by groups of intelligent unmanned aerial vehicles has been carried out, which allows determining the most effective way of its implementation according to the criteria of minimum time and limited functionality of onboard computers. A model of knowledge representation is proposed irrespective of a specific subject area, which provides the possibility of planning purposeful behavior in a priori undescribed conditions of the problem environment. Procedures for processing knowledge and finding solutions by using semantic networks have been developed that allow planning purposeful behavior of intelligent unmanned aerial vehicles in the process of solving various subtasks of a complex flight task with polynomial complexity.

Keywords: group, unmanned aerial vehicles, model of knowledge representation, frames of action, frames of relations, active semantic network, inference on semantic networks.

DOI 10.14357/20718594190207

References

1. Norvig P. 2015. *Iskusstvennyj intellekt. Sovremennyj podhod. Rukovodstvo* [Artificial intelligence. Modern approach. Guide]. M.: Dialektika / Vil'yams. 1408 p.
2. Andrejchuk A.A. 2018. *Algoritm planirovaniya i soglasovaniya sovokupnosti traektorij dlya grupy intellektual'nyh agentov* [Algorithm of planning and coordination of a set of trajectories for a group of intelligent agents] // *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making.]. № 4. Pp.72-85.
3. Rondan U. Biard, Timoti U. MakLehjn. 2015. *Malye bespilotnye letatel'nye apparaty. Teoriya i praktika* [Small unmanned aerial vehicles. Theory and practice]. Moscow: Tekhnosfera. 312 p.
4. Abrosimov V.K. 2017. *Kollektivy intellektual'nyh letatel'nyh apparatov* [Groups of intelligent aircraft]. Moscow: Nauka. 304 p.
5. Kilani Y., Bsoul M., Alsarhan A., Al-Khasawneh A. 2013. *A Survey of the Satisfiability-Problems Solving Algorithms.* // *Intern. J. Advanced Intelligence Paradigms.* 3:233 –256.
6. Lyugger Dzh. F. 2005. *Iskusstvennyj intellekt: strategii i metody resheniya slozhnyh problem* [Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems]. 4-e izd. M.: Vil'yams. 863 p.
7. Kelly A. 2013. *Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods.* Cambridge: Cambridge University Press. 808 p.
8. Vagin V.N., Derevenko A.V. Kutepov V.P. 2017. *Algoritmy paralelnogo logicheskogo vyvoda i issledovanie ih effektivnosti na komp'yuternyh sistemah* [Parallel algorithms of logical inference and the study of their effectiveness on computer systems] // *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making.]. №1. Pp.3-9.
9. Kober J., Peters J. 2014. *Learning Motor Skills: From Algorithms to Robot Experiments.* Cham: Springer. 201 p.
10. Osipov G.S. 2014. *Lekcii po iskusstvennomu intellektu* [Lectures on artificial intelligence]. Moscow: Liberkom. 272 p.
11. Bershtejn L.S., Melekhin V.B. 1994. *Planirovanie povedeniya intellektual'nogo robota* [Intelligent robot behavior planning]. Moscow: Ehnergoatomizdat. 240 p.
12. Khachumov M.V. 2018. *Planirovanie i modelirovanie traektorii dvizheniya letatel'nogo apparata v slozhnyh usloviyah* [Planning and modeling of the trajectory of the aircraft in difficult conditions] // *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij* [Artificial intelligence and decision-making]. Pp. 3-11.
13. Melekhin V.B., Khachumov M.V. 2018. *Planirovanie marshruta celenapravlenno go poleta avtonomnogo letatel'nogo apparata na nizkoj vysote v usloviyah neopredelennosti* [Planning of the route of a purposeful flight of an autonomous aircraft at low altitude under uncertainty] // *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making]. Pp. 18-27.