

Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами¹

Аннотация. В работе рассмотрен ряд вопросов, возникающих в области автоматизации управления малыми беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) мультироторного типа. Предложена совокупность методов планирования и управления, рассмотрена задача организации взаимодействия различных методов и алгоритмов (авторских и известных) в единую интеллектуальную систему управления БПЛА. Предлагается использование трех уровней управления – стратегического, тактического и реактивного, описывается соответствующая архитектура – STRL (от англ. strategic, tactical, reactive, layered). Использование этой архитектуры позволит автоматизировать управление коалициями БПЛА при решении широкого круга задач в различных средах.

Ключевые слова: многоуровневая архитектура, интеллектуальная система управления, беспилотные летательные аппараты, знаковая картина мира, планирование траектории, нелинейное управление, уравнение Риккати.

Введение

Одной из наиболее перспективных и активно-развивающихся междисциплинарных областей, находящейся на стыке математических, инженерных и компьютерных наук, является область, связанная с проектированием и разработкой беспилотных транспортных средств различного типа и назначения, в частности – малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Среди последних широкое распространение получили аппараты вертикального взлета и посадки, выполненные по мультироторной схеме: AscTec Hummingbird [1], Parrot AR.Drone [2, 3], mikrokopter [4], 3DR IRIS [5] и др. Упомянутые БПЛА представляют собой унифицированные платформы, которые оборудованы необходимыми датчиками, органами управления, бортовыми вычислителями (полетными контроллерами), а также встроенным программным обеспечением, которое используется для автоматизации отдельных режимов

полета и маневров (взлет, посадка, полет в плоскости, изменение угла рысканья и т.д.).

Базовое бортовое программное обеспечение обычно допускает возможность интеграции сторонних модулей по открытым протоколам и программным интерфейсам, и эта возможность активно используется исследователями. Последние разрабатывают и программно реализуют различные методы управления и навигации (например обзор в [6]) для их последующего включения в единую систему управления БПЛА [7]. Весьма актуальной при этом является задача организации взаимодействия модулей (разработки архитектуры системы управления), решению которой и посвящена настоящая работа.

Системы управления, представляющие наибольший интерес в настоящее время, являются интеллектуальными системами управления [8] (ИСУ). ИСУ – это такая система, которая в автоматическом режиме способна к решению нетривиальных, интеллектуальных задач, включая планирование, целеполагание, прогнозирование, формирование коалиций, и тем самым способна

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-11-00692).

обеспечить высокий уровень автономности объекта управления (БПЛА). Ряд вышеперечисленных задач не решается в рамках известных подходов искусственного интеллекта и требует привлечения новых методов, развиваемых в рамках компьютерного когнитивного моделирования, где используются модели когнитивных функций человека. Исследователями в этой области разрабатываются отдельные элементы интеллектуальных систем управления, которые, однако, не являются самодостаточными. Для построения полноценной системы управления реальным сложным техническим объектом необходима интеграция методов решения указанных выше интеллектуальных задач с методами решения таких задач как локализация, планирование траектории, следование по траектории, т.е. задач более низкого уровня. Такая интеграция и является предметом исследования данной работы.

В работе рассматриваются такие средние и низкоуровневые задачи как стабилизация БПЛА, планирование траектории, а также предлагаются методы решения высокоуровневых задач (построение картины мира, планирование поведения и т.д.), опирающиеся на модели соответствующих когнитивных функций, подтвержденные психологическими и нейрофизиологическими данными. В результате рассмотрения предлагается многоуровневая архитектура – STRL архитектура (от англ. Strategic, Tactical, Reactive, Layered) интеллектуальной системы управления БПЛА, использование которой позволит автоматизировать управление не только отдельным БПЛА, но и их коалициями при решении широкого круга сложных, комплексных задач в различных средах.

1. Системы управления БПЛА

Известно множество различных подходов к созданию систем управления сложными техническими объектами, в том числе БПЛА, и общая классификация архитектур таких систем затруднена [9]. Одним из возможных способов классификации является использование следующих критериев: уровень иерархии – одноуровневые, двухуровневые, многоуровневые и т.д., и тип функциональной декомпозиции – явная и неявная. При указанном способе классификации в отдельный класс архитектур ИСУ БПЛА обычно выделяют плоские, одноуровневые архитектуры с явной функциональной де-

композицией. В этом случае система управления представляет собой набор модулей не связанных никакой иерархией, и каждый модуль решает вполне определенный набор задач. Интеллектуальные функции при этом распределены по всей системе, т.е. каждый модуль может реализовывать часть из них. Пример подобной архитектуры описан, например, в [10]. К другому классу архитектур относятся многоуровневые архитектуры с неявной функциональной декомпозицией. Каждый уровень архитектуры состоит из элементов, абстрагирующих отдельные сущности управления (подсистема БПЛА, сам БПЛА, группа БПЛА, группа групп БПЛА и т.д.), и каждый элемент состоит из фиксированного числа идентичных модулей с неявной спецификацией. Наиболее показательный пример подобного рода архитектур – 4D/RCS [11]. В рамках 4D/RCS выделяются следующие неявно специфицированные модули (или, в оригинальной терминологии, – функциональные процессы), которые реализуют каждую функцию системы: планирование, моделирование, обработка сигналов, оценивание свойств. Неявность спецификации заключается в следующем (рассмотрим на примере модуля «планирование»). На более высоких уровнях иерархии 4D/RCS под «планированием» понимается планирование поведения (т.е. поиск планов в пространстве формализованных ситуаций, возможностей, целей объекта управления), на более низких – планирование траектории, ещё на более низких – управление (т.е. поиск планов в пространстве управляющих сигналов БПЛА). При таком подходе интеллектуальные функции сконцентрированы на верхних уровнях иерархии и определены неявно.

Наконец, самыми распространенными являются многоуровневые архитектуры с явной функциональной декомпозицией. В этом случае функциональность каждого модуля явно определена, и модули разделены на уровни: чем выше уровень, тем больше возможностей абстрагирования от значений сигналов сенсоров БПЛА используется в соответствующем данному уровню представлении знаний. Задачи, решаемые на более высоких уровнях системы, таким образом, считаются более сложными, интеллектуальными. Обычно в области робототехники и беспилотных транспортных средств выделяют три уровня управления [12]. В качестве примера соответствующих архитектур

можно назвать ATLANTIS [13], 3T [14], Aura [15] и другие. Упомянутые архитектуры подразумевают реактивную выработку управляющих сигналов для органов управления (реактивное управление) на нижнем уровне, и решение всех остальных (делиберативных) задач на верхнем, в то время как средний уровень обеспечивает межуровневые взаимодействия.

Предлагаемая в работе архитектура, STRL, также является трехуровневой, однако ее средний уровень выполняет не только роль интерфейса между верхним и нижним уровнями, но и инкапсулирует значительную часть функционала, связанного с пространственной навигацией. К значимым отличиям предлагаемой архитектуры относятся также: поддержка механизмов коллективного планирования и распределения ролей, поддержка механизмов трансляции ограничений на динамику движения в геометрические ограничения на форму траектории, планирование с учетом этих ограничений и ряд других. Далее опишем STRL архитектуру более подробно.

2. Многоуровневая система управления STRL

В настоящей работе предлагается архитектура системы управления БПЛА, состоящая из трех уровней: стратегического, тактического и реактивного (архитектура STRL: strategic, tactical, reactive layered). Система, построенная по предложенной архитектуре, управляет поведением сложного технического объекта (например, БПЛА) в условиях коллективного взаимодействия при решении общих и частных задач. Стратегический уровень является ответственным за реализацию высокоуровневых интеллектуальных функций. На нем используется знаковое представление знаний [16] и осуществляется обмен сообщениями с остальными участниками коалиции. Тактический и реактивный уровни содержат модули, поддерживающие эти процедуры и транслирующие их управление в низкоуровневые управляющие сигналы. Общий вид архитектуры представлен на Рис. 1, где показаны основные модули, выделенные в соответствии с функциональными возможностями каждого из уровней, а также взаимодействие между ними (вид и направление передаваемых данных).

Основной задачей управления на стратегическом уровне является построение согласованного плана поведения участника совместной деятельности. Система управления участника коалиции строит и поддерживает в актуальном состоянии картину мира, которая является уникальной для каждой системы благодаря как характерным свойствам, ограничивающим множество доступных системе управления действий, так и благодаря различию в строении компонент элементов картины мира. Общими компонентами всех участников коалиции являются компоненты значения элементов картины мира (раздел 3.1).

Построение плана поведения происходит с помощью обмена сообщениями с другими участниками коалиции. На каждом этапе выполнения плана происходит обновление описания текущей ситуации, в том числе, и с участием информации, поступающей от сенсоров. Из описания текущей ситуации планирования выделяется пространственно-временная информация, которая формирует задание, поступающее на тактический уровень управления и содержащее пространственное описание целевой области, в которую необходимо переместить объект управления, а также временные ограничения на её достижение. Модули тактического уровня возвращают результат о возможности/невозможности выполнения задания по перемещению с заданными ограничениями и, при необходимости, процедура перепланирования на стратегическом уровне вносит согласованные с остальными участниками коалиции коррективы в общий план.

На тактическом уровне управления решаются задачи навигации объекта управления в пространстве, основными из которых являются: картирование (построение, обновление, уточнение модели (карты) местности), локализация (привязка объекта управления к имеющейся карте) и планирование траектории. Последняя задача разбивается на 3 фазы: прогнозирование, непосредственно построение плана и мониторинг.

В модуль прогнозирования поступает информация со стратегического уровня управления о целевой области пространства и временных ограничениях на достижение этой области объектом управления, после чего осуществляется предварительный расчет необходимых параметров движения (например, скорости) для выполнения поставленного задания. Основное отличие методов прогнозирования траектории

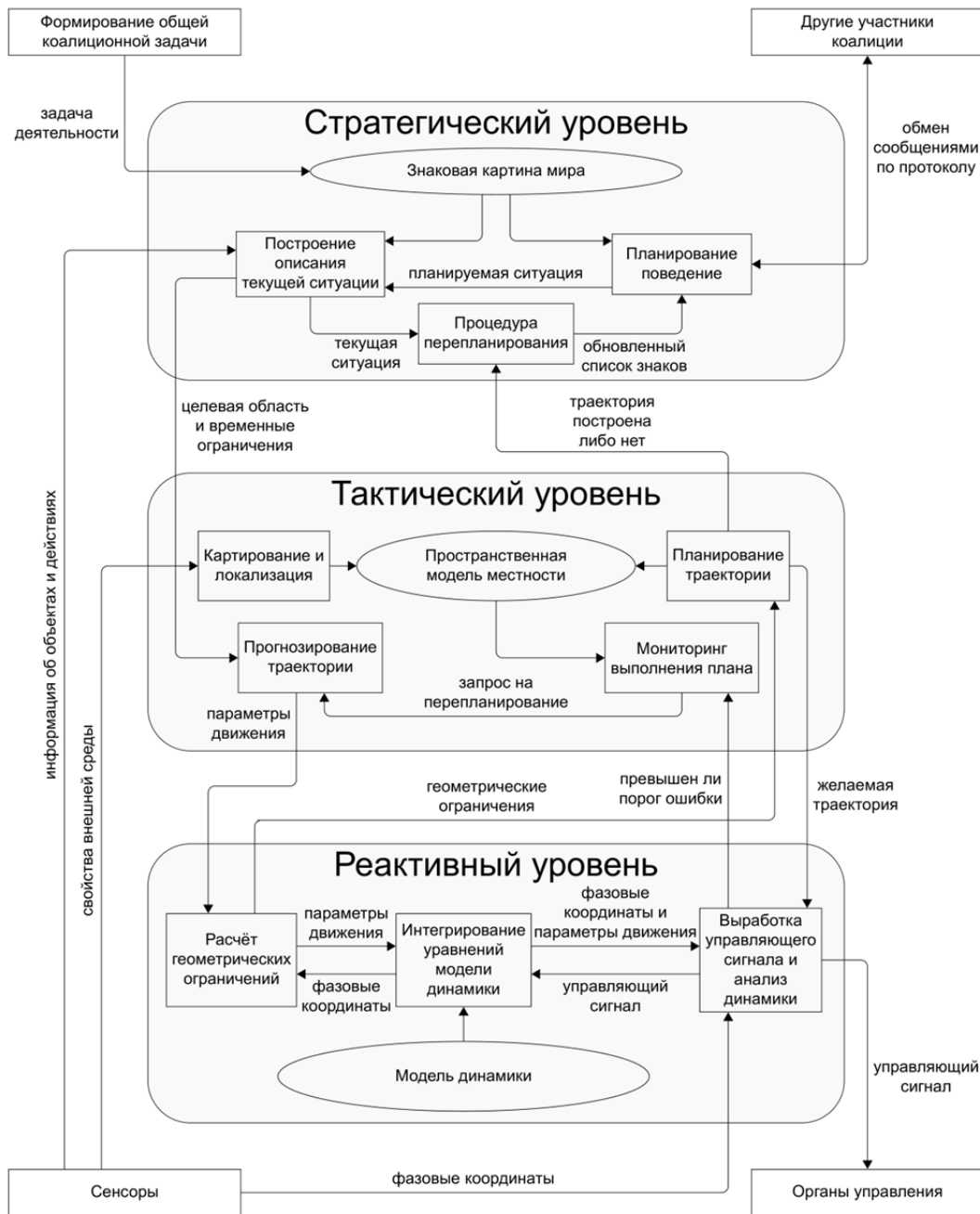


Рис. 1. Архитектура STRL системы управления БПЛА

от методов собственно планирования заключается в том, что первые могут пренебрегать ограничениями на динамику движения объекта управления и другими ограничениями. За счет этого прогнозирование траектории осуществляется с минимальными затратами вычислительных ресурсов.

Рассчитанные модулем прогнозирования параметры движения передаются на нижний (реактивный) уровень управления, на котором осуществляется учет ограничений на динамику

движения объекта управления, в результате чего формируются геометрические ограничения на форму траектории, соблюдение которых гарантирует возможность следования по ней при определенных ограничениях на внешние возмущения. Далее планирование осуществляется с учетом этих геометрических ограничений. Результатом работы модуля планирования является построенная траектория (тогда на верхний уровень передается соответствующее сообщение), либо сигнал о том, что при заданных

ограничениях задача планирования траектории невыполнима (за отведённое время). В последнем случае на стратегический уровень передается запрос на перепланирование, т.е. на выбор другой целевой области в пространстве и/или других временных ограничений.

Таким образом, планирование траектории представляет собой итеративный процесс с обратными связями, как от верхнего, так и от нижнего уровней управления, что является существенным отличием предлагаемой архитектуры от современных аналогов. Предполагается, что использование итеративной процесса «прогнозирование – расчет геометрических ограничений – планирование траектории – планирование поведения» позволит существенно повысить качество решения задачи интеллектуального управления сложными техническими объектами, т.е. позволит решать такие задачи, которые не могут быть решены в рамках имеющихся подходов.

Основной задачей управления сложным техническим объектом на реактивном уровне является обеспечение заданных характеристик динамического объекта с помощью управляющего воздействия по принципу обратной связи. Для этого в процедуру выработки управляющего сигнала с тактического уровня поступают желаемая траектория и желаемые параметры движения (например, скорость). Уровень может работать в двух режимах: управления реальным объектом и численного моделирования процесса управления (используется для отладки и изучения свойств построенной системы).

В первом случае информация о текущих характеристиках динамического объекта (фазовые координаты) поступает от сенсоров, а управление подается на органы управления. Во втором – информация о текущих характеристиках динамического объекта поступает от процедуры интегрирования уравнений модели динамики полета, в нее же передается и текущее управляющее воздействие.

Кроме того, на реактивном уровне происходит анализ ошибки управления, т.е. определение того, на сколько фазовые координаты объекта (реально измеренные или полученные в ходе численного моделирования) отличаются от заданных. Ошибка сравнивается с допустимым порогом, результат сравнения передается на тактический уровень в модуль мониторинга выполнения плана.

Разработанная архитектура системы управления имеет ряд ключевых особенностей. Во-первых, она включает в себя основанный на моделях когнитивных функций человека стратегический уровень управления. Во-вторых, она использует новый подход в задаче планирования траекторий, предполагающее активное взаимодействие с верхним и нижним уровнями управления, в том числе, вычисление геометрических ограничений на форму траектории, которые обусловлены особенностями динамической модели объекта управления. Наконец, в-третьих, применение особого вида обратной связи на тактическом уровне позволяет распространить данную архитектуру управления не только на разные виды БПЛА, но и на другие виды сложных технических объектов.

В дальнейших разделах работы представлены отдельные особенности решения задач на каждом уровне системы и кратко описана работа основных модулей ИСУ STRL.

3. Стратегический уровень управления

3.1. Представление знаний

Знаковое представление знаний, используемое для построения картины мира БПЛА, опирается на психологические теории, в которых дается не только качественное описание свойств когнитивных функций, но и приводятся структурные описания лежащих в их основе психических образований. К таким теориям относятся культурно-исторический подход Выготского-Лурии [17], теория деятельности Леонтьева [18] и модель психики Артемьевой [19]. Согласно перечисленным психологическим подходам высшие когнитивные функции осуществляются в рамках так называемой мотивированной предметной деятельности, когда объекты и процессы внешней среды (денотаты) опосредованы для субъекта (человека или активного технического устройства) специальными образованиями, называемыми знаками. Участие знака в той или иной когнитивной функции определяется его структурой, в которую входят образ, значение и личностный смысл [16]. Образная составляющая отвечает за функции воспроизведения и различения денотата в ходе деятельности. Составляющая значения представляет собой место данного знака в той или иной знаковой системе, которая отра-

жает в функциональном смысле наработанные общей практикой коллектива-владельца данной знаковой системы способы использования опосредуемого предмета или процесса. Иными словами в значении знака заключены общие знания о функционировании данного предмета или процесса. Наконец, составляющая личностного смысла несет в себе собственный опыт действий субъекта с денотатом знака, который выражается, в том числе, и в интегральной оценке роли этого денотата в его текущей деятельности: способствует ли данные процесс или предмет достижению текущего мотива.

Трехкомпонентная структура элемента картины мира, которая, как было сказано выше, в психологии называется знаком, подтверждается и рядом работ нейрофизиологов [20, 21]. Кроме того, по современным нейрофизиологическим представлениям строение коры головного мозга практически однородно во всем своем объеме (наличие колонок неокортекса). При этом множество связей между достаточно малыми зонами коры (так называемый коннектом [22]) явно указывают на иерархичность ее строения и на присутствие как восходящих, так и обратных, нисходящих связей. Отсюда следует, что компоненты элемента картины мира должны обладать иерархическим однородным строением с восходящими потоками информации и нисходящей обратной связью. Кроме того, образная компонента должна иметь такую функцию распознавания, которая при категоризации статических объектов и динамических процессов использует обратную связь для предсказания сигнала в следующие моменты времени.

Для формального описания структуры элемента картины мира была предложена [23] иерархия следующих автоматов Мили с переменной структурой и конечной памятью (распознающий автомат или R -автомат):

$$R_i^j = \langle X_i^j \times \hat{X}_i^{j+1}, 2^{Z_i^j}, X_i^{*j} \times \hat{X}_i^j, \varphi_i^j, \bar{\eta}_i^j \rangle$$

где i – сквозной индекс автомата в иерархии, j – уровень иерархии, X_i^j – множество входных сигналов, X_i^{*j} – множество выходных сигналов, \hat{X}_i^{j+1} – множество управляющих (предсказывающих) сигналов с верхнего уровня иерархии, \hat{X}_i^j – множество управляющих (предсказывающих) сигналов на нижний уровень иерархии, $2^{Z_i^j}$ –

множество состояний (множество подмножеств множества матриц предсказания (см. далее)), $\varphi_i^j : X_i^j \times \hat{X}_i^{j+1} \rightarrow 2^{Z_i^j}$ – функция переходов, $\bar{\eta}_i^j : 2^{Z_i^j} \rightarrow X_i^{*j} \times \hat{X}_i^j$ – вектор-функция выходов. Входные, выходные и управляющие сигналы представляют собой вектора действительных чисел, каждый компонент которых является весом распознаваемого или входного признака.

В качестве функции распознавания k -ого выходного признака \hat{f}_k в R -автомате удобно использовать набор булевых матриц предсказания $Z_k = \{Z_1^k, Z_2^k, \dots, Z_m^k\}$, в которых каждый столбец \bar{z}_u^r является вектором предсказания входных признаков в момент времени $\tau_s + u$, где τ_s – начало вычислительного цикла (момент действия управляющего сигнала \hat{x}_i^{j+1}). Сама матрица Z_r^k задаёт последовательность битовых векторов, наличие 1 в котором свидетельствует о необходимости соответствующего входного признака для распознаваемого функцией \hat{f}_k признака. Алгоритм \mathcal{A}_{th} вычисления функции переходов φ_i^j и выходной функции $\bar{\eta}_i^j$ по начальному моменту времени τ_s , управляющему воздействию $\hat{x}_i^{j+1}(\tau_s)$ и входному воздействию ω_i^j представлен на Рис 2.

Введение такого автомата и некоторых соотношений на множестве R -автоматов позволяет определить все компоненты знака. Так, образом знака s , соответствующего признаку f_1 , будет называться такое подмножество $p(s)$ признаков, что $\forall f_i \in p(s) f_i \sqsubset f_1$. Здесь отношение \sqsubset является отношением распознавания одного признака с помощью другого (выход распознающего автомата для признака f_i является входом распознающего автомата для признака f_1). Выделение подмножества процедурных признаков, опосредующих действия и процессы, в которых столбцы матрицы предсказания разделены на столбцы условий и столбцы эффектов, ведет к следующему определению значения. Если f_1 – признак, соответствующий знаку s , f_2 – процедурный при-

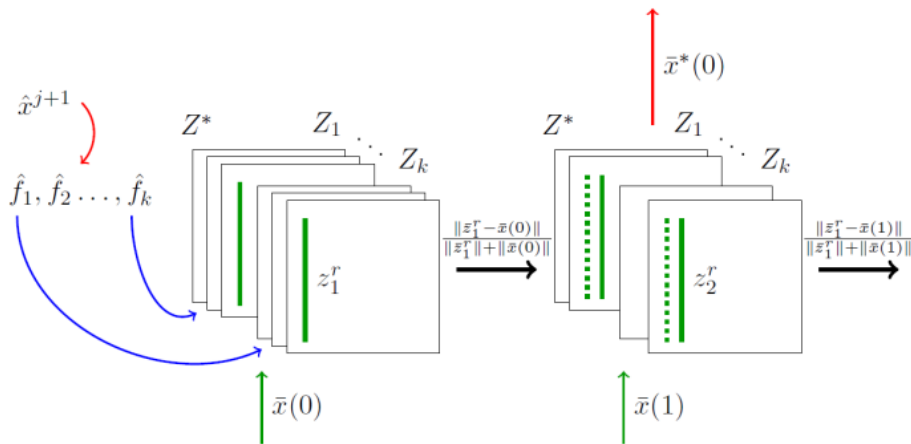


Рис. 2. Схема работы распознающего автомата (нижние индексы опущены)

Из множества функций распознавания \hat{F}_i^j по управляющему вектору \hat{x}^{j+1} , поступающему с верхнего уровня иерархии, выбирается подмножество активных функций, по которому формируется множество активных матриц предсказания Z^* . Это множество фильтруется в каждый момент времени в соответствии с расстоянием до входного вектора \bar{x}^j . Также каждый момент времени вычисляется выходной вектор \bar{x}^* и управляющий вектор \hat{x}^j , отправляемый на нижний уровень иерархии

знак, $f_1 \sqsubset^c f_2$, то будем называть f_2 элементом значения признака f_1 . Отношение \sqsubset^c показывает, что признак f_2 находится в столбце условий матрицы предсказания признака f_1 . Наконец, введение выделенного подмножества личностных признаков F_l приводит к определению личностного смысла: если f_1 – признак, соответствующий знаку s , f_2 – процедурный признак, $f_1 \sqsubset^c f_2$, $\exists f_l \in F_l f_l \sqsubset^c f_2$, то будем называть f_2 элементом личностного смысла признака f_1 .

На множестве компонент знака в процессе деятельности субъекта возникают определенные отношения, что, в свою очередь, приводит к формированию картины мира. Для описания ситуаций в картине мира используются три типа семантических сетей: сеть на образах знаков, сеть на значениях и сеть на личностных смыслах. Процессы самоорганизации на этих сетях включают в себя помимо пополнения семейств отношений также и образование новых узлов сети, что соответствует образованию нового элемента картины мира.

Процесс формирования нового знака включает в себя определение связей между компонен-

тами знака, а затем именование получающейся структуры [16]. На первом этапе происходит итерационный процесс формирования будущего образа знака на основе поступающей из внешней среды эталонного значения (например, из сообщения от другого участника коалиции). Данный итерационный процесс в случае его сходимости приводит к связыванию образа, значения и имени знака. Личностный смысл формируется на основе прецедентов действия с опосредуемым предметом или процессом.

Рассмотрение процедурных признаков в виде правил с определенными множествами добавляемых и удаляемых признаков позволяет сформировать алгоритм основного итерационного процесса образования знака с помощью R-автоматов [24].

3.2. Синтез плана поведения

Изложенное выше представление знаний, используемое на стратегическом уровне управления БПЛА, позволяет описывать высокоуровневые ситуации, представляющие собой множество знаков, с некоторыми отношениями на именах этих знаков, транслируемые с одного из трех типов семантических сетей на компонентах. Такое описание ситуаций включает как пространственно-временные данные, так и данные о поведении других участников коа-

лиции [25]. Сообщения, получаемые системой управления от других участников коалиции, представляют собой формальные записи ситуаций, т.е. перечисление имен знаков и типов отношений, связывающих эти имена. Общая часть картины мира участников коалиции включает в себя имена знаков и компоненты значений, что обеспечивает корректное прочтение сообщения адресатом, в том случае, если сообщения не будут содержать противоречащую образную и смысловую составляющие.

Знаковое представление знаний позволяет построить алгоритмы планирования поведения, целеполагания и распределения ролей в коллективе БПЛА. Так, алгоритм планирования поведения, учитывающий действия других участников коалиции, представляет собой поэтапное построение цепочки прогнозируемых ситуаций на основе компонент знаков, составляющих предыдущие в цепочке ситуации (в том числе начальные и целевые ситуации, которые являются входными данными для алгоритма планирования). Для построенной ситуации конструируется действие (личностный смысл ситуации), которое оценивается как успешное, приближающее к целевой ситуации. План, таким образом, представляет собой последовательность действий, переводящих начальную, текущую ситуацию в конечную, целевую. Действием – этапом плана – может быть также и действие другого участника коалиции, если соответствующий ему знак с необходимыми компонентами присутствует в картине мира. Актуальность знаков, опосредующих других участников коалиции, поддерживается за счет обмена сообщениями, что также обеспечивает и согласование общего плана выполнения задачи. Подробно алгоритмы планирования и распределения ролей в коалиции интеллектуальных агентов описаны в работе [24].

После составления плана, запускается процесс его реализации: из описания промежуточных ситуаций выделяется пространственно-временная составляющая и передается на нижний тактический уровень управления. В случае успешного построения и следования по траектории происходит переход к следующей промежуточной ситуации. В случае же возникновения препятствий (невозможно построить или пролететь по траектории с заданным временным ограничением) поступает сигнал к перепланированию и происходит новая оценка ситуации и обновление плана.

4. Тактический уровень управления

На тактическом уровне управления решаются задачи навигации БПЛА в окружающей среде. При этом модули уровня взаимодействуют как с модулями стратегического, так и с модулями реактивного уровней, поэтому тактический уровень помимо реализации навигационного функционала является связующим уровнем STRL-архитектуры. Предполагается, что функциональные процессы, протекающие на верхнем и нижнем уровнях управления, допускают пространственную интерпретацию части операционных (рабочих) данных, что обуславливает возможность интеграции этих данных в пространственную модель мира (ПММ), которая является базой знаний тактического уровня управления, и за счет чего и осуществляется межуровневая связь. Другими словами, предполагается, что с верхнего уровня иерархии поступают сигналы (соответствующие определенным высокоуровневым целям) о том, какого пространственного положения (и за какое время) необходимо достичь объекту управления и эти сигналы могут быть встроены в пространственную модель мира на тактическом уровне. В то же время реактивный уровень реализует (посредством отдельного модуля) функционал преобразования ограничений на динамику движения объекта управления в пространственные ограничения (геометрические, метрические и др.), которые также допускают интерпретацию в рамках используемой пространственной модели. К основным задачам тактического уровня управления относятся: определение текущего состояния БПЛА относительно пространственной модели мира (фактически – локализация БПЛА), поддержание модели в актуальном, непротиворечивом состоянии и осуществление планирования в рамках этой модели (планирование траектории).

В современной робототехнике и искусственном интеллекте первые две задачи обычно объединяются в одну – задачу одновременного картирования и локализации (англ. термин – SLAM). Методы решения этой задачи существенно зависят от того, какими входными данными располагает объект управления, что, в свою очередь, зависит от того какими датчиками он оснащён. Если у БПЛА имеется лазерный дальномер, то для локализации и картирования обычно применяются алгоритмы сопоставления

сканов (scan matching), хорошо зарекомендовавшие себя в области наземной робототехники (например, [26]). Если БПЛА оснащён стереопарой, то используются методы вычислительной геометрии и компьютерного зрения [27]. Если же БПЛА оснащён одной камерой, то возможно применение следующих, активно разрабатываемых в настоящее время методов: LSD-SLAM [28], PTAM [29], ORB-SLAM [30] и др. Необходимо отметить, что во многих случаях в качестве входных данных для решения задачи одновременного картирования и локализации используется также пространственная модель (карта) известная априори (возможно содержащая неточности). Также стоит упомянуть, что в некоторых случаях, задача локализации становится тривиальной (например, когда осуществляется полет в открытой местности, а БПЛА оснащён датчиками приема сигналов глобальных позиционных систем (GPS, ГЛОНАСС)). Подводя итог вышесказанному, отметим, что в рамках STRL-архитектуры не предлагается использование конкретных методов картирования и локализации, т.к. указанные методы существенным образом зависят от модели конкретного БПЛА, для которого разрабатывается система управления.

Методы планирования траектории, в отличие от вышеперечисленных методов одновременного картирования и локализации, являются более универсальными, т.к. обработка непосредственно сенсорной информации при планировании не производится. В рамках STRL-архитектуры предполагается, что в качестве входных данных для метода построения траектории выступают пространственная модель местности, а также начальное и целевое положение объекта управления в этой модели. Обычно ПММ это граф, вершинам которого соответствуют координаты возможных положений БПЛА (центра масс БЛА) в пространстве, а ребрам – т.н. элементарные траектории, т.е. такие траектории следование по которым обеспечивается реактивным уровнем управления в автоматическом режиме. Следовательно, задача планирования траектории сводится к задаче поиска пути на графе.

В рамках STRL-архитектуры предлагается использование графов особой структуры, а именно – графов регулярной декомпозиции, метрических-топологических графов (MT-графов) [31] – в качестве пространственной мо-

дели местности. Эти графы являются простыми, и вместе с тем информативными модели, активно используемыми в робототехнике [32], [33]. Для поиска пути на MT-графе (графе регулярной декомпозиции) в рамках STRL-архитектуры предлагается использовать авторский метод поиска пути – LIAN [34], который позволяет учитывать ограничения на форму траектории, формируемые на реактивном уровне управления (раздел 5.2). Результатом планирования при таком подходе является траектория, следование вдоль которой гарантировано обеспечивается модулями реактивного уровня управления при определенных ограничениях на внешние возмущения (траектория, учитывающая ограничения на динамику полета БПЛА). Заметим, что альтернативные подходы к учету ограничений на динамику движения объекта управления [35, 36] приводят к существенному росту пространства состояний, что заметно снижает их эффективность при решении практических задач.

Предлагается следующая модель геометрических ограничений. Считается, что реализуемая траектория представляет собой последовательность отрезков таких, что угол отклонения между любыми смежными отрезками последовательности не превышает (по модулю) некоторого фиксированного значения α . Для определения таких ограничений предложен метод, основанный на анализе области достижимости динамических систем (раздел 5.2). Для построения траектории, учитывающей эти ограничения, предложен метод LIAN [34]. Этот метод, может рассматриваться как модификация классического алгоритма эвристического поиска – A^* [37]. Поиск осуществляется в пространстве особой структуры, при этом используются дополнительные правила отсечения. Другими косвенно близкими к LIAN алгоритмами являются R^* [38] и Θ^* [39]. Подчеркнем, однако, что ни один из упомянутых алгоритмов не позволяет учитывать описанные выше ограничения на форму траектории (т.е. неприменим в рамках STRL-архитектуры). Подробно алгоритм и его свойства рассмотрен в работах [34], [40]. Пример построенной алгоритмом траектории приведен на Рис. 3.

Для формирования пространственных ограничений на форму траектории модулям реактивного уровня должны быть переданы в качестве входных данные, определяющие желаемые

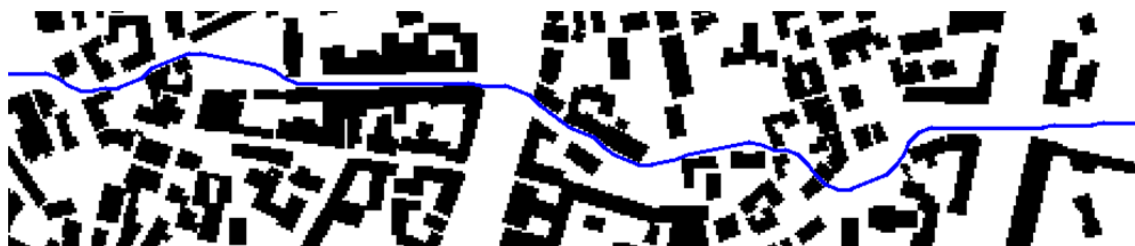


Рис. 3. Траектория, построенная алгоритмом LIAN

параметры движения объекта управления (например – скорость БПЛА). Для получения этих данных используется модуль прогнозирования траектории. Фактически прогнозирование траектории осуществляется за счет быстрого планирования траектории, без учета ограничений (пространственных (препятствия), ограничений на динамику движения и др.), для чего могут использоваться вычислительно эффективные модификации эвристического поиска, такие как, например, алгоритм JPS [41]. В простейшем случае прогнозирование может быть сведено к построению отрезка прямой, соединяющей начальное и целевое положение. Зная длину этого отрезка, очевидно, можно вычислить значение минимальной требуемой скорости движения, которое и подлежит передаче на реактивный уровень управления для формирования геометрических ограничений (вычисления значения угла α).

Оставшимся неопианным модулем тактического уровня управления является модуль мониторинга выполнения плана (т.е. следования по траектории). Этот модуль получает информацию (от модулей нижестоящего уровня) о текущем положении БПЛА и сравнивает это положение с имеющимся планом (построенной траекторией). Если отклонение превышает заданное (или вычисляемое) пороговое значение, то цикл планирования («прогнозирование» - «вычисление геометрических ограничений» - «планирование с геометрическими ограничениями») повторяется. Если из текущего положения не удастся построить траекторию до целевой области, то соответствующее сообщение отправляется на стратегический уровень управления и инициируется процесс смены цели.

5. Реактивный уровень управления

Основной задачей на реактивном уровне является обеспечение заданных характеристик

динамического объекта (желаемой скорости, местоположения и др.), полученных с тактического уровня. Это осуществляется с помощью процедуры выработки управляющего сигнала и анализа динамики. В случае режима управления реальным объектом, управляющий сигнал подается на органы управления БПЛА: двигатели винтов, элероны и т.д., а в режиме моделирования – в процедуру интегрирования уравнений модели динамики полета. Так или иначе, для выработки управляющего сигнала необходимо решить задачу построения регулятора. Другой задачей реактивного уровня является определение геометрических ограничений на допустимую траекторию перемещения при заданных тактическим уровнем параметрах полета. Для ее решения разработана специальная процедура.

Далее опишем решение задач построения регулятора и определение ограничений, предлагаемое в рамках построенной архитектуры.

5.1 Метод построения регулятора

В области автоматического управления существует множество подходов и техник к построению регулятора. Некоторые из них косвенно связаны с когнитивной деятельностью человека на уровне реализации и контроля моторных действий. Так, например, управление на основе искусственных нейронных сетей [42], использует принцип обучения по примерам, а управление на основе нечеткой логики [43] использует формализованное интуитивное знание экспертов предметной области. Применение этих техник особенно актуально, когда нет возможности построить адекватную математическую модель БПЛА. Основным недостатком этих подходов является отсутствие строгого доказательства работоспособности созданных регуляторов.

С другой стороны, существует множество свободных от этого недостатка строгих с матема-

тической точки зрения техник, не опирающихся на биологическую моторную деятельность, например, линейно-квадратичный синтез, H_{∞} синтез, линеаризация обратной связью, бекстеппинг (backstepping) и др. К их недостаткам относятся ограниченная область применения: они работают либо с линейной моделью БПЛА, либо с нелинейной моделью особого вида.

В предложенной авторами архитектуре используется один из перспективных подходов, основанных на уравнении Риккати с зависящими от состояния коэффициентами (State Depended Riccati Equation – SDRE). Работы в этой области активно ведутся с середины 90-х годов прошлого века [44, 45]. Развитие и применение этого подхода, с одной стороны, позволяет получить достаточно общую методологию для построения субоптимальных гладких нелинейных регуляторов для нелинейных систем, коэффициенты которых также зависят от состояния. С другой стороны, в SDRE управлении можно использовать некоторые принципы, по которым реализуются низшие когнитивные функции человека, связанные с контролем и выполнением моторных действий. А именно: адаптировать работу регулятора в зависимости от режима и условий работы и существующих ограничений на управление. Это достигается с помощью задания линейного квадратичного функционала качества, отражающего требования к качеству переходного процесса и содержащего две весовые матрицы: при состоянии системы и при управлении. Элементы этих весовых матриц являются нелинейными гладкими функциями состояния, что позволяет задавать различные требования к переходному процессу в зависимости от режима работы системы (областей фазового пространства), а также учитывать существующие ограничения на управление. Например, при посадке БПЛА необходимо повышать требования к точности траектории, т.е. увеличивать значения соответствующих весовых элементов в матрице при состоянии, и, следовательно, изменять закон управления. Другой пример – создание с помощью весовой матрицы при управлении области в фазовом пространстве, где коэффициент усиления должен быть понижен, т.к. есть вероятность выхода управления «на упор». Регулятор стремится минимизировать значение функционала качества. Для этого при каждом значении вектора состояния численно решается соответствующее

матричное уравнение Риккати, учитывающее как изменение весовых матриц в критерии качества, так и нелинейности самого БПЛА.

Синтезированные этим способом регуляторы могут достаточно хорошо компенсировать нелинейности управляемой системы, учитывают [46, 47] ограничения на управление и состояние системы, способны непрерывно изменять алгоритм работы регулятора в зависимости от сценария задачи. Однако важным вопросом в SDRE управлении является компромисс между точностью решения и вычислительной сложностью метода.

Авторами предложен новый подход к построению SDRE нелинейного регулятора в численно-аналитической форме. Традиционные подходы в области SDRE управления связаны с необходимостью применения поточечного вычисления уравнения Риккати, интерполяционных процедур на полученной сетке, а также проведения различных символьных вычислений, что в реальных задачах может потребовать больших вычислительных ресурсов. Применение аналитических формул существенно снижает вычислительную сложность выработки управления с помощью SDRE техники. Кратко опишем предложенный подход.

Будем рассматривать нелинейную систему управления моторными действиями на полуоси с линейно входящим управлением, где коэффициенты могут быть зависимыми от состояния

$$\frac{dx}{dt} = (A_0 + A_1(x))x + (B_0 + B_1(x))u, \quad x(0) = x^0, \quad (1)$$

$$x \in X \subset \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^r, t \in [0, \infty),$$

где $A_0, A_1(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}, B_0, B_1(x) \in \mathbb{R}^{n \times r}, X$ – некоторое ограниченное множество пространства состояний БПЛА (рабочие режимы), u – управление, x – вектор состояния (вектор фазовых координат БПЛА). Для любого непрерывного управления траектория системы (1) существует и единственна на $[0, \infty)$.

Задача. Требуется построить такое управление $u(x)$, что траектория замкнутой системы (1) будет асимптотически стремиться к нулю, т.е. $x(t, \varepsilon) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ и

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q(x)x + u^T R(x)u) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

где I – функционал качества, который минимизируется управлением u , $Q(x), R(x)$ – заданные

положительно полуопределенная и положительно определенная весовые матрицы, определяющие «значимость» ошибок управления и расхода управления соответственно. Задавая различные зависимости элементов этих матриц от вектора состояния можно изменять алгоритм работы регулятора в зависимости от режима работы БПЛА. Далее для простоты изложения будем считать матрицу $R(x) = R_0$ постоянной.

Представление объекта управления в виде (1) обладает рядом преимуществ. Оно позволяет:

- отражать достаточно широкий спектр нелинейности реальной системы;
- позволяет строить управление на основе номинальной модели системы;
- выполнять строгое обоснование предлагаемого подхода на основе второго метода Ляпунова.

Теперь рассмотрим некоторые общепринятые для SDRE техники условия:

- элементы матриц $A_1(x), B_1(x)$ и их частные производные есть гладкие функции и равномерно ограничены в некоторой рабочей области $G = \{x \in X, t \geq 0\}$;
- пара матриц A_0, B_0 управляемы, а пара матриц $A_0, Q_0^{\frac{1}{2}}$ наблюдаемы.

Если эти условия выполняются, то решение задачи (2) в рамках SDRE подхода имеет вид:

$$u(x) = -R_0^{-1} B_0^T(x) K(x) x, \quad (3)$$

где $K(x)$ – положительно определенное решение соответствующего уравнения Риккати для текущего значения $x(t)$. Поскольку объект динамический, т.е. x может непрерывно меняться, то для выработки управления (3) необходимо решать уравнение Риккати в каждый момент времени. Последнее технически может быть реализовано лишь с некоторым временным шагом, обусловленным вычислительной сложностью решения конкретной задачи.

В архитектуре STRL используется подход [48], согласно которому управление $u(x)$ ищется в виде

$$u(x) = u_0 + u_1(x), \quad (4)$$

где u_0 – управление (3) для номинальной системы (1) (т.е. в которой $A_1(x) \equiv 0, B_1(x) \equiv 0$) при номинальном значении функционала (т.е. когда $Q(x) \equiv Q_0$ – известная постоянная матрица). Управление u_0 вычисляется лишь один раз. До-

полнительный нелинейный член $u_1(x)$ вычисляется путем интегрирования специальной матрицы, представленной в аналитической форме. Таким образом, отсутствует необходимость решения матричного уравнения Риккати для каждого $x(t)$. Вместо этого мы имеем дело с известным аналитическим выражением, решение которого может быть оценено заранее. Следовательно, существенно снижаются вычислительные затраты на выработку управления, что особенно актуально для бортовых вычислителей или управления БПЛА с быстрой динамикой. Отметим, что управление (4) не является оптимальным для задачи (2), и имеет некоторый субоптимальный характер.

С помощью функции Ляпунова $V(x, t) = x^T(K(x))x > 0, \forall x \neq 0$ при некоторых дополнительных условиях можно показать, что положение равновесия $x=0$ в замкнутой системе (1)-(4) асимптотически устойчиво по Ляпунову, т.е. $x(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Таким образом, предложен численно-аналитический алгоритм построения регулятора, нелинейно зависящего от переменных состояния, что резко уменьшает объем вычислений по сравнению с применением традиционных SDRE процедур. Другой отличительной чертой регулятора является достаточная математическая строгость, а также возможность использовать некоторые принципы, на которых основывается управление моторными действиями человека: адаптировать работу регулятора в зависимости от режима, условий работы и существующих ограничений на управление.

5.2. Процедура определения геометрических ограничений

При полете в горизонтальной плоскости тактический уровень пытается построить траекторию в виде последовательности отрезков таких, что угол отклонения между любыми смежными отрезками не превышает по модулю некоторого фиксированного значения α . Предполагается, что соблюдение этого условия гарантирует реализуемость полученной траектории, т.е. возможность выработки допустимых управляющих сигналов для следования по ней с заданной ошибкой. Предложенная процедура определения геометрических ограничений на максимально допустимый угол α основывается на анализе области достижимости динамической

системы. Точное решение этой задачи, как правило, требует больших вычислительных затрат. Однако, авторами был предложен упрощенный подход, основанный на некоторых правдоподобных допущениях и обладающий достаточной общностью применения.

Предположим, что БПЛА должен следовать по траектории tr . Основное допущение метода состоит в том, что при имеющихся ограничениях на расход управления и при заданных условиях полета существует некоторая окрестность *прямолинейного* участка траектории tr , заданная радиусом r_d (Рис. 4), внутри которой всегда имеется возможность выработки допустимого управления, при котором БПЛА не покинет эту окрестность. Фактически r_d определяет «трубку», внутри которой должен происходить полет вдоль прямолинейной участка траектории tr .

В методе рассматривается наилучший для управления случай при «изломе» траектории - нахождение БПЛА в точке P с максимальным углом отклонения вектора земной скорости V_g равным α_v . Выделяется свободная от препятствий область, заданная окружностью C с центром в P и радиусом R_d . Фактически, R_d определяет область совершения маневра поворота.

Задача определения угла α формулируется следующим образом. Необходимо определить такой максимальный угол α , что начав движение в точке P со скоростью V_g и используя максимальное допустимое управление БПЛА, не покидая окружность C , вновь вернется в область, определяемую радиусом r_d . Тогда, согласно основному предположению, БПЛА уже не покинет допустимую область полета, заданную r_d , и продолжит следование по текущему прямолинейному участку траектории tr .

Предложенная для решения этой задачи процедура основывается на численном моделировании динамики полета при максимальном управлении, стремящемся вернуть БПЛА в область полета, определяемую радиусом r_d , и геометрическом анализе полученной траектории. Процедура была опробована для математической модели квадрокоптера AscTec Hummingbird [1]. Максимальное значение угла α в 24.4° было вычислено для параметров $V_g = 7$ м/с, $\alpha_v = 45^\circ$, $R_d = 2.7$ м.

Таким образом, предложен достаточно общий метод, позволяющий на основе модели динамики полета и допустимого управления, а также при некоторых разумных предположени-

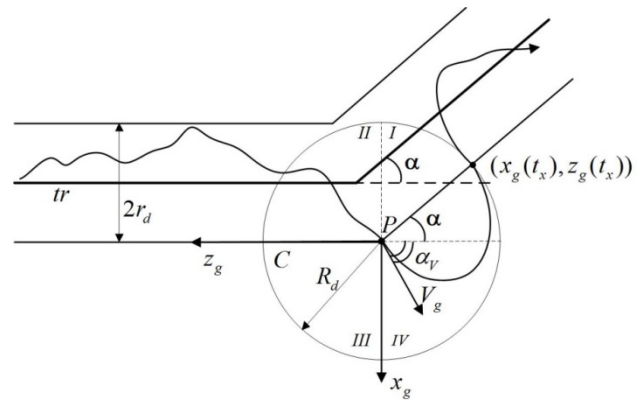


Рис. 4. К методу определения геометрических ограничений

ях определить ограничения на геометрию траектории. Метод может быть адаптирован для учета внешних возмущений, например, ветра. Более полно метод изложен в [34].

Заключение

В последнее время наблюдается повышенный интерес к автономным летательным аппаратам мультироторного типа, что отчасти обусловлено снижением их стоимости и широкой распространённостью. На данный момент существует большое число унифицированных платформ БПЛА, оборудованных всем необходимым программным и аппаратным обеспечением для выполнения основных маневров и на первый план выходит проблема исследования и разработки методов взаимодействия между модулями системы управления и методов организации иерархических связей между этими модулями. Иными словами – задача построения архитектуры управления современным БПЛА. Такая система управления должна решать нетривиальные интеллектуальные задачи (планирования, целеполагание, формирования коалиций и др.), обеспечивая высокий уровень автономности БПЛА.

В рамках компьютерного когнитивного моделирования решение перечисленных задач основывается на построении моделей когнитивных функций человека. Поэтому нами была предложена многоуровневая архитектура STRL для интеллектуальных систем управления, использующая компьютерные когнитивные модели. В тоже время, STRL архитектура отражает специфику конкретного типа технического

объекта – мультироторного БПЛА: учитываются его динамика и кинематика.

Каждый модуль STRL предназначается для решения одной или нескольких конкретных задач. Модули сгруппированы по уровням, каждый из которых характеризуется своей степенью абстракции: чем выше уровень иерархии, тем более абстрактное представление входных сигналов используется на нем для решения задач. В предложенной архитектуре выделяются три уровня управления: стратегический, тактический и реактивный.

Основной задачей на стратегическом уровне является планирование поведения отдельного БПЛА – участника коалиции и его координация с остальными членами. Отличительная черта разработанного стратегического уровня заключается в использовании знаковой картины мира, построенной с помощью представления знаний, основанного на нейрофизиологических и психологических исследованиях когнитивных функций человека. За счет формализации элемента картины мира – знака – и определения отношения на множестве знаков это представление позволяет строить алгоритмы планирования поведения коалиции, выработки целей и коммуникации.

Задача навигации БПЛА решается на тактическом уровне, который связывает высокоуровневую и низкоуровневую деятельность системы управления. Основной особенностью этого уровня является использование ограничений на геометрию траектории, отражающих динамику БПЛА, а также итеративного процесса «прогнозирование – расчет геометрических ограничений – планирование траектории – планирование поведения» для решения задачи планирования перемещения. Предполагается, что такой подход (разделение планирования на более простые подзадачи) значительно улучшит вычислительную эффективность планирования траектории и, следовательно, улучшит общую эффективность системы управления.

Основной задачей реактивного уровня является следование по траектории с заданной скоростью. Требуемые скорость и траектория передаются с тактического уровня. Для решения задачи следования в архитектуре используется нелинейное управление, полученное на основе решения оригинальным способом уравнения Риккати с параметрами, зависящими от состояния. Такой подход позволяет существенно сни-

зить вычислительные затраты на выработку управляющего сигнала.

Предложенная архитектура позволяет реализовать эффективные системы интеллектуального управления коалицией автономных технических средств, выполняющих широких спектр сложных задач, требующих распределения ролей в группах, планирования поведения, решения проблем локализации, привязки к карте, планирования траектории, точного и качественного управления системами с нелинейной динамикой. Эффективность достигается за счет высокого уровня взаимодействия оригинальных методов группового и траекторного планирования, а также методов выработки управляющего сигнала.

Литература

1. <http://www.asctec.de/en/uav-uas-drone-products/asctec-hummingbird/>
2. Bristeau P.-J., Callou F., Vissiere D., Petit N. The Navigation and Control Technology Inside the AR.Drone Micro UAV // Preprints of the 18th IFAC World Congress (Milano, Italy). Milano: IFAC, 2011. V. 18(1). P. 1477–1484.
3. <http://ardrone2.parrot.com/>
4. <http://mikrokooper.de>
5. <http://3drobotics.com/iris/>
6. Kendoul F. Survey of advances in guidance, navigation, and control of unmanned rotorcraft systems. // Journal of Field Robotics. 2012. V. 29. №2. P. 315–378.
7. Яковлев К.С., Петров А.В., Хитков В.В. Программный комплекс навигации и управления беспилотными транспортными средствами // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 3. С. 72–83.
8. Осипов Г.С., Тихомиров И.А., Хачумов В.М., Яковлев К.С. Интеллектуальное управление транспортными средствами: стандарты, проекты, реализации // Авиакосмическое приборостроение. 2009. № 6. С. 34–43.
9. Samsonovich A.V. Comparative Analysis of Implemented Cognitive Architectures // BICA. 2011. P. 469–479.
10. Jameson S., Franke J., Szczerba R., Stockdale S. Collaborative autonomy for manned/unmanned teams // ANNUAL FORUM PROCEEDINGS-AMERICAN HELICOPTER SOCIETY. AMERICAN HELICOPTER SOCIETY, INC. 2005. V. 61. №. 2. P. 1673.
11. Albus J. S. 4D/RCS: a reference model architecture for intelligent unmanned ground vehicles // AeroSense 2002. International Society for Optics and Photonics. 2002. P. 303–310.
12. Яковлев К.С., Макаров Д.А., Панов А.И., Зубарев Д.В. Принципы построения многоуровневых архитектур систем управления беспилотными летательными аппаратами // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 4. С.10–28.
13. Gat E. Integrating planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for controlling real-world mobile robots // AAAI. 1992. V. 1992. P. 809–815.

14. Bonasso R. P., Kortenkamp D. Characterizing an architecture for intelligent, reactive agents // AAAI Spring Symposium. 1995.
15. Arkin R.C. Motor schema based navigation for a mobile robot: An approach to programming by behavior // Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on. 1987. V. 4. P. 264–271.
16. Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В. Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 83–96.
17. Выготский Л. С. Мышление и речь // Психология развития человека / под ред. С. Бобко. Эксмо. 2005. С. 664–1019.
18. Леонтьев А. Н. Деятельность. Сознание. Личность. 2-е изд. М.: Политиздат, 1977. С. 304.
19. Артемьева Е. Ю. Психология субъективной семантики. М.: Издательство ЛКИ, 2007. С. 136.
20. Эделмен Д., Маунткасл В. Разумный мозг / под ред. Е. Н. Соколов; пер. Н. Ю. Алексеенко. М.: Мир, 1981. С. 135.
21. Иваницкий А.М. Мозговая основа субъективных переживаний: гипотеза информационного синтеза // Журнал высшей нервной деятельности. 1996. Т. 46. № 2. С. 241–282.
22. Sequencing the connectome / A. M. Zador, J. Dubnau, H. K. Ouyibo et al. // PLoS biology. 2012. V. 10, № 10.
23. Панов А. И. Алгебраические свойства операторов распознавания в моделях зрительного восприятия // Машинное обучение и анализ данных. 2014. Т. 1. № 7. С. 863–874.
24. Осипов Г. С., Панов А. И., Чудова Н. В. Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. 2015. № 5.
25. Панов А. И. Представление знаний в задачах согласованного перемещения группы БПЛА // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015, 9 октября 2015 г.): материалы семинара. 2015.
26. Borrmann D. Globally consistent 3D mapping with scan matching / Elseberg J., Lingemann K., Nuchter A., Hertzberg J. // Robotics and Autonomous Systems. 2008. V. 56. P. 130–142.
27. Sim R. Vision-Based SLAM Using the Rao-Blackwellised Particle Filter / Elinas P., Griffin M., Little J. // Proc. IJCAI-2005 Workshop Reasoning with Uncertainty in Robotics. 2005. P. 9–16.
28. Engel J., Schöps T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM // Computer Vision—ECCV 2014. 2014. P. 834–849.
29. Klein G., Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces // Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007. 6th IEEE and ACM International Symposium on. IEEE. 2007. P. 225–234.
30. Mur-Artal R., Montiel J.M.M., Tardos J.D. ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System // CoRR. 2015. V. abs/1502.00956. <http://arxiv.org/abs/1502.00956>.
31. Яковлев К.С., Баскин Е.С. Графовые модели в задаче планирования траектории на плоскости // Искусственный интеллект и принятие решений. № 1. 2013. С. 5–12.
32. Elfes A. Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation // Computer. 1989. V. 22. №. 6. P. 46–57.
33. De Filippis L., Guglieri G., Quagliotti F. Path planning strategies for UAVS in 3D environments // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2012. V. 65. №.1–4. P. 247–264.
34. Яковлев К.С., Макаров Д.А., Баскин Е.С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета // Искусственный интеллект и принятие решений. № 4. 2014. С. 3–17.
35. Kuwata Y. et al. Real-time motion planning with applications to autonomous urban driving // Control Systems Technology. IEEE Transactions on. 2009. V. 17. №. 5. P. 1105–1118.
36. Kothari M., Postlethwaite I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2013. V. 71. №. 2. P. 231–253.
37. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // Systems Science and Cybernetics. IEEE Transactions on. 1968. V. 4. №. 2. P. 100–107.
38. Likhachev M., Stentz A. R* Search // Proceedings of the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence (2008). 2008. P. 344–350.
39. Nash A. et al. Theta*: Any-Angle Path Planning on Grids / Daniel K., Koenig S., Felner A. // Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, CA: AAAI Press, 2007. V. 22. №. 2. P. 1177.
40. Yakovlev K., Baskin E., Hramoin I. Grid-based angle-constrained path planning // Proceedings of the 38th German Conference on Artificial Intelligence (KI-2015). 2015. P.208-221.
41. Harabor D.D., Grastien A. Online Graph Pruning for Path-finding On Grid Maps // AAAI. 2011.
42. Buskey G., Wyeth G., Roberts J. Autonomous helicopter hover using an artificial neural network // Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation. 2001. P. 1635–1640.
43. Garcia R., Valavanis K. The implementation of an autonomous helicopter testbed // Journal of Intelligent and Robotics Systems. 2009. Vol. 54. P. 423–454.
44. Mracek C.P., Cloutier J.R. Control designs for the nonlinear benchmark problem via the state-dependent Riccati equation method // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 1998. №8. P. 401–433.
45. Cimen T. State dependent Riccati Equation (SDRE) control: A Survey // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6–11. 2008. P. 3761–3775.
46. Cloutier J.R., Cockburn J.C. The state-dependent nonlinear regulator with state constraints. In: Proc. of the American Control Conference. Arlington. 2001. P. 390–395.
47. Cloutier J.R., Stansbery D.T. Dynamic conversion of flight path angle commands to body attitude commands. // Proc. of the American Control Conference. Anchorage. 2002. 221–225.
48. Дмитриев М.Г., Макаров Д.А. Гладкий нелинейный регулятор в слабо нелинейной системе управления с коэффициентами, зависящими от состояния // Труды ИСА РАН. 2014. Т. 64. № 4. С. 3–13.

Макаров Дмитрий Александрович. Старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук. Окончил Рыбинскую государственную авиационную технологическую академию им. П.А. Соловьева в 2008 году. Кандидат физико-математических наук. Автор 21 печатной работы. Область научных интересов: управление сложными динамическими системами, робастные методы устойчивости и стабилизируемости, искусственный интеллект, экспертные системы. E-mail: makarov@isa.ru.

Панов Александр Игоревич. Научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук. Окончил в 2009 году Новосибирский государственный университет, в 2011 году Московский физико-технический институт (государственный университет). Кандидат физико-математических наук. Автор 25 печатных работ. Область научных интересов: методы машинного обучения, распознавание образов, когнитивное компьютерное моделирование, мультиагентные системы. E-mail: pan@isa.ru.

Яковлев Константин Сергеевич. Старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук. Кандидат физико-математических наук. Автор 22 печатных работ. Область научных интересов: искусственный интеллект, робототехника, когнитивные науки, интеллектуальные динамические системы, интеллектуальные системы управления, планирование, планирование траектории, моделирование целенаправленного поведения, эвристический поиск. E-mail: yakovlev@isa.ru