Artificial Intelligence Review manuscript No. (will be inserted by the editor)

Multilayer cognitive architecture for AUV control

Dmitry Makarov ***·*** Aleksandr Panov ***·***

Konstantin Yakovlev

Received: date / Accepted: date

Аннотация Our abstract.

Keywords First keyword *·* Second keyword *·* More 1 Introduction

Проектирование и разработка беспилотных транспортных средств различного ти- па и назначения – одна из наиболее динамично развивающихся областей в науке и технике в последнее время. К факторам, положительно влияющим на наблюда- емое ускорение прогресса в этой области, можно отнести: миниатюризацию дат- чиков, улучшение их характеристик, удешевление компонентной базы, повышение производительности бортовых вычислителей и др. Одна из тенденций последне- го времени – появление унифицированных робототехнических платформ, осна- щенных необходимым набором датчиков и исполнительных механизмов (актуа- торов), а также программным обеспечением с открытыми интерфейсами (API), позволяющих исследователям сосредоточиться непосредственно на программной реализации системы управления (СУ) аппаратом. Если говорить о беспилотных летательных аппаратах (БЛА), то к таким платформам, пользующимся большой популярностью, можно отнести AR.Drone [1, 2], mikrokopter [3]. Характерно, что обе эти платформы представляют собой малые квадрокоптеры (вес – менее ки- лограмма, размеры – не более 50 см. в диаметре), т.е. винтокрылые аппараты вертикального взлета и посадки с числом винтов 4-6 шт.

Стоит заметить, что в последнее время наблюдается смещение интересов робо- технического сообщества от колесных роботов к летательным аппаратам (ЛА), т.к. первые изучаются уже достаточно давно и считается, что задача создания беспи- лотного, полностью автономного колесного аппарата (например, на базе серийного

This work was supported by the Russian Scientific Foundation, project no. 14-11-00692.

D. Makarov *·* A. Panov *·* K. Yakovlev

Institute for Systems Analysis RAS, Moscow, Russia Tel.: +7-499-131273

E-mail: [makaro](mailto:makarov@isa.ru)[v@isa.ru](mailto:v@isa.ru)

автомобиля) принципиально решена, что подтверждается успешным завершени- ям ряда масштабных проектов в этой сфере (см. например результаты одного из последних соревнований беспилотных автомобилей DARPA Urban Challenge [4]). Задача же автоматизации управления объекта со сложной нелинейной динамикой в трехмерном пространстве на текущий момент не решена. И именно c решением этой задачи связывают существенный прогресс в области создания новых мето- дов и алгоритмов распознавания образов, управления, планирования траектории, построения модели мира и др.

В данной работе под БЛА понимается в первую очередь малый квадрокоптер, такой как, например, уже упомянутый AR.Drone. При этом описываемые в статье принципы построения архитектуры СУ БЛА применимы и для других типов ЛА как то: БЛА классических вертолетных компоновок (с одним несущим и одним рулевым винтами, с двумя несущими соосными винтами), БЛА самолетного типа и др.

1. Recent works

Одним из наиболее распространенных подходов к построению архитектуры про- граммной системы управления БЛА является подход, основанный на функци- ональный декомпозиции, когда СУ представляет собой совокупность взаимно- увязанных программных модулей, каждый из которых предназначен для реше- ния определенного типа задач. Число таких модулей и принципы их связывания в единую структуру в общем случае не регламентированы. Заметим, однако, что в конце 90-х годов ХХ века принимались определенные попытки стандартизации в этой сфере. Так можно отметить стандарт JAUS [5], определяющий протоколы и форматы межмодульных взаимодействий. Предполагалось, что следование это- му стандарту обеспечит возможность создания СУ путем включения модулей от различных разработчиков, а также «быстрой замены» модулей в случае необхо- димости.

При модульной декомпозиции, обычно выделяются следующие классы задач:

* + планирование – составление планов достижения целей и решения поставлен- ных задач;
  + взаимодействие – формирование групп БЛА и обеспечение взаимодействия между членами групп;
  + управление в нештатных ситуациях – идентификация, анализ и ликвидация последствий возникающих незапланированных/нештатных ситуаций;
  + оценка обстановки – формирование модели мира;
  + управление коммуникациями – обеспечение взаимодействия с коммуникацион- ными системами БЛА;
  + управление БЛА – планирование траектории (с учетом рельефа, препятствий и динамики вертолета), управление системами и узлами вертолета, датчиками, оружием;
  + управление ресурсами – управлением вычислительными ресурсами, распреде- ление ресурсов между компонентами системы.

Пример СУ БЛА, состоящей из модулей, предназначенных для решения вы- шеприведенных классов задач, описан в [6].

В начале 2000х годов, в национальном институте стандартизации США (NIST) под руководством профессора Альбуса (Albus) функционировала группа, занима- ющаяся разработкой концептуальной модели архитектуры СУ для беспилотной техники, которая бы не опиралась на функционально-модульную декомпозицию. Такая концептуальная модель архитектура была создана и получила название 4D/RCS [7].

Основным структурным элементом 4D/RCS является узел, определяемый как совокупность четырех процессов системы управления:

* + обработка сенсорной информации;
  + построение модели мира;
  + оценивание свойств;
  + выбор управляющих воздействий (генерация поведения).

Фактически процесс в модели 4D/RCS – есть архитектурный модуль, основ- ное отличие которого от модулей, описываемых выше – неявная типизация. То есть отдельный модуль, например, планирования или составления расписаний не предусматривается моделью, однако функционал последних включается в модуль генерации поведения.

Стоит отметить, что модель 4D/RCS предполагает возможность создания иерар- хий узлов (т.е. создания многоуровневых архитектур управления). При этом со- став компонент узлов 4D/RCS не меняется от уровня к уровню, но меняется се- мантика протекающих в узлах процессов – например, на более высоком уровне управления под генерацией поведения понимается планирование поведения (дей- ствий), а на более низком – планирование траектории (перемещений).

Заметим, что идея многоуровневых архитектур не нова в робототехнике, искус- ственном интеллекте (ИИ), теории управления и смежных дисциплинах. Однако обычно, когда речь идет о разделении на уровни, выделяют два из них – делибе- ративный и реактивный [8]. Программные модули реактивного уровня, реализуют непосредственно управление исполнительными механизмами беспилотного аппа- рата, а также «быструю» обработку информации для решения задач так или иначе связанных с поддержание заданных параметров (скорости, углового положения и т.д.). На делиберативном уровне выполняются задачи построения модели мира, оценки обстановки, планирования и т.д. Важным вопросом при таком подходе яв- ляется принцип организации взаимодействия между двумя уровнями. Проработ- ке этого вопроса посвящен ряд работ (например, обзор [9]), анализируя которые можно сделать вывод о том, что наиболее распространен следующий подход. Мо- дули реактивного уровня являются полностью самодостаточными, то есть задачи, решаемые на этом уровне, имеют наивысший приоритет (например, задача под- держания заданной высоты и/или скорости). Результатом же функционирования модулей делиберативного уровня является формирование целей и задач на таком уровне абстракции, что они являются непосредственными входными данными для реактивных модулей (например, «в течение 10 минут обеспечить зависание над за- данной точкой»).

Можно утверждать, что к настоящему моменту применение одно- и двух- уровневых архитектур для построения систем управления беспилотной техникой нецелесообразно в силу следующих двух, взаимосвязанных факторов. Во-первых, возрастает объем данных, поступающих от датчиков объекта управления. Во- вторых, анализируя и обрабатывая определенным образом поступающие данные, становится возможным решение широкого спектра задач, объединение которых в

рамках одного делиберативного уровня приводит к чрезмерному усложнению мо- дульной архитектуры и дублированию модулей, концептуально предназначенных для решения единой задачи, но использующих для этого разные методы. В каче- стве примера можно привести задачу планирования, одновременно решаемую на делиберативном уровнях в разных контекстах (и разными методами) – контексте целей (планирование поведения) и контексте перемещений (планирование траек- тории). Соответственно целесообразным видится дальнейшее разбиение делибе- ративного уровня на подуровни: стратегический (ответственный за постановку и выбор целей, прогнозирование, и высокоуровневую обработку информации) и так- тический (ответственный за распознавание образов, построение карты местности, планирование траектории и др.).

Итак, на основе проведенного анализа имеющихся подходов к построению ар- хитектуры системы управления БЛА, можно сделать вывод о целесообразности применения трехуровневой архитектуры с выделением следующих уровней: стра- тегического, тактического и уровня управления. Основным отличием программ- ных модулей расположенных на разных уровнях является степень обработки вхо- дящей информации и время отклика. Так на нижнем уровне (уровне управле- ния) происходит оперативная обработка данных непосредственно поступающих от датчиков БЛА для решения задач выдерживания параметров управления. На среднем уровне (тактическом) происходит дальнейшая обработка информации и создание простейших информационных структур (графов, таблиц) для решения задач распознавания образов, построения модели местности, локализации, плани- рования траектории и др. На верхнем уровне (стратегическом) решаются задачи, требующие наибольшей степени обработки данных и создания сложных информа- ционных структур (систем фреймов, неоднородных семантических сетей, систем правил и др.).

1. General view of architecture

В ходе работ по проекту разработана концептуальная схема архитектуры систе- мы управления, состоящая из трех уровней: стратегического, тактического и ре- активного. Архитектура описывает (см. рис. 1) основные модули, выделенные в соответствии с функциональными возможностями каждого из уровней, а также взаимодействие между ними (вид и направление передаваемых данных).

Основной задачей управление на стратегическом уровне является построение согласованного между членами коалиции плана поведения каждого участника совместной деятельности. Каждый участник обладает собственной картиной ми- ра, которая специфична благодаря как характерным свойствам, ограничивающим множество доступных системе управления действий, так и компонентами элемен- тов картины мира. Компоненты значения всех элементов картины мира для всех участников коалиции одинаковы по определению.

Построение плана поведения происходит за счет обмена сообщениями с други- ми участниками коалиции. На каждом этапе выполнения плана происходит обнов- ление описания текущей ситуации, в том числе и с участием информации, поступа- ющей от сенсоров. Из описания текущей ситуации выделяется пространственно- временная информация, которая формирует задание, поступающее на тактиче- ский уровень управления и содержащее пространственное описание целевой обла- сти и временные ограничения на её достижение.

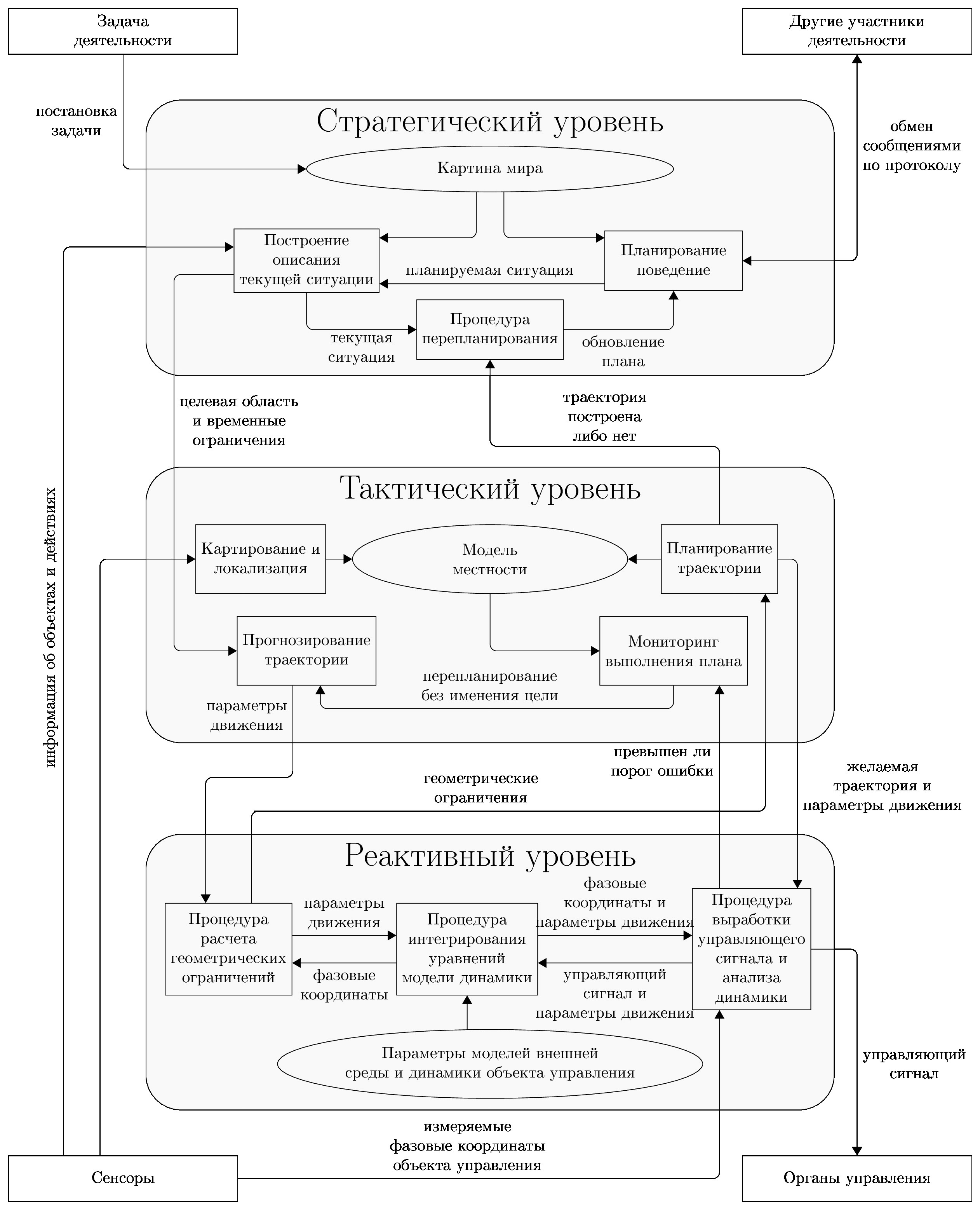


Рис. 1 Schema of proposed congitive architecture.

Процедура перепланирования принимает результат о возможности или невоз- можности с заданными ограничениями выполнить задание по перемещению и при необходимости вносит согласованные с остальными участниками коалиции кор- рективы в общий план.

На тактическом уровне управления решаются задачи навигации объекта управ- ления в пространстве, основными из которых являются: картирование (построе- ние, обновление, уточнение модели (карты) местности), локализация (привязка объекта управления к имеющейся карте) и планирование траектории. Послед-

няя задача разбивается на 3 фазы: прогнозирование, непосредственно построе- ние плана и мониторинг. В модуль прогнозирования поступает информация со стратегического уровня управления о целевой области пространства и времен- ных ограничениях на достижение этой области объектом управления, после че- го осуществляется предварительный расчет необходимых параметров движения (например - скорости) для выполнения поставленного задания. Основное отли- чие методов прогнозирования траектории от методов собственно планирования заключается в том, что первые могут пренебрегать ограничениями на динамику движения объекта управления и другими ограничениями. За счет этого прогнози- рование траектории осуществляется с минимальными затратами вычислительных ресурсов. Рассчитанные модулем прогнозирования параметры движения переда- ются на нижний (реактивный) уровень управления, на котором уже осуществля- ется учет ограничений на динамику движения объекта управления. В результа- те формируются геометрические ограничения на форму траектории, соблюдение которых гарантирует возможность следования по ней при фиксированных, рас- считанных ранее параметрах движения (скорости). Модуль планирования строит траекторию с учетом этих геометрических ограничений. Результатом его рабо- ты является построенная траектория (тогда на верхний уровень передается со- ответствующее сообщение), либо сигнал о том, что при заданных ограничениях задача планирования траектории невыполнима (за отведённое время). В послед- нем 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 ите- ративный процесс с обратными связями как от верхнего, так и от нижнего уров- ней управления, что является существенным отличием предлагаемой архитектуры от современных аналогов. Предполагается, что использование итеративной петли “прогнозирование - расчет геометрических ограничений - планирование траекто- рии - планирование поведения” позволит существенно повысить качество реше- ния задачи интеллектуального управления сложными техническими объектами, т.е. позволит решать такие задачи, которые не могут быть решены в рамках име- ющихся подходов. Основной задачей управление сложным техническим объектом на реактивном уровне является обеспечение заданных характеристик динамиче- ского 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 объ- ектом и численного моделирование процесса управления.

В первом случае информация о текущих характеристиках динамического объ- екта (фазовые координаты) поступает от сенсоров, а управление подается на ор- ганы управления. Во втором - информация о текущих характеристиках динами- ческого объекта поступает от процедуры интегрирования уравнений модели ди- намики полета, в нее же передается и текущее управляющее воздействие.

На реактивном уровне также с помощью соответствующей процедуры решает- ся задача определения геометрических ограничений на допустимую траекторию перемещения. Для чего в эту процедуру с тактического уровня от модуля прогно- зирования поступают желаемые параметры движения, которые передаются далее в процедуру интегрирования уравнений модели. На основании анализа получен- ных фазовых координат определяются геометрические ограничения, которые пе- редаются обратно на тактический уровень в модуль планирования траектории.

Кроме того, на тактическом уровне происходит анализ ошибки управления, т.е. 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.

1. Details of organization of strategic level
   1. Knowledge representation

В качестве базовых психологических теорий, в которых дается не только ка- чественное описание свойств когнитивных функций, но и приводятся структур- ные описания лежащих в их основе психических образований, были использова- ны культурно-исторический подход Выготского-Лурии [1,2], теория деятельности Леонтьева [3] и модель психики Артемьевой [4]. Согласно приведенным теориям высшие сознательные когнитивные функции осуществляются в рамках так на- зываемой мотивированной предметной деятельности, когда объекты и процессы внешней среды опосредованы для субъекта специальными образованиями, назы- ваемыми знаками. Процесс задействования знака в той или иной когнитивной функции имеет три образующих: образ, значение и личностный смысл. Образная составляющая отвечает за функции воспроизведения и разлиичения опосредуе- мого предмета или процесса в ходе деятельности. Составляющая значения пред- ставляет собой место данного знака в той или иной надпсихологической знако- вой системе, которая отражает в функциональном смысле наработанные общей исторической практикой коллектива-владельца данной знаковой системы спосо- бы использования опосредуемого предмета или процесса. Наконец, составляющая личностного смысла несет в себе собственный опыт действования субъекта с де- нотатом знака, который выражается в том числе и в интегральной оценке роли этого денотата в его текущей деятельности: способствует ли данные процесс или предмет удовлетворению текущего мотива.

Трехкомпонентная структура элемента индивидуального знания, которая как было сказано выше, в психологии называется знаком, подтверждается и теми ра- ботами нейрофизиологов, в которых предпринимается попытка построить общую теорию работы мозга человека. Так в теории повторного входа Эделмена [5] и Иваницкого [6] утверждается, что образование осознанного ощущения или фик- сация входного потока информации происходит только в том случае, когда ак- тивированное сенсорным входом возбуждение через ассоциативные зоны коры от гиппокампа, а затем от гипоталамуса накладывается на сенсорный след в проекци- онной коре. Такой «круг ощущений», проходящий за характерное время в 150-300 мс, последовательно активирует три компоненты индивидуального знания: образ- ную (проекционная и сенсорная зоны коры), компоненту значения (гиппокамп) и личностного смысла (гипоталамус). Кроме того, по современным нейрофизиоло- гическим представлениям строение коры головного мозга практически однородно во всем своем объеме (наличие колонок неокортекса). При этом множество свя- зей между достаточно малыми зонами коры (так называемый коннектом) явно указывают на иерархичность ее строения и на присутствие как восходящих, так и обратных, нисходящих связей. Отсюда следует, что компоненты элемента ин- дивидуального знания должны обладать иерархическим однородным строением

с восходящими потоками информации и нисходящей обратной связью. Кроме то- го, образная компонента должна иметь такую функцию распознавания, которая кроме категоризации статических объектов и динамических процессов использует обратную связь для предсказания сигнала в следующий момент времени.

В качестве математической модели базовой составляющей всех компонент элемента индивидуального знания был предложен следующий бесконечный автомат Миля с переменной структурой и конечной памятью (распознающий автомат или -автомат):

где – сквозной индекс автомата в иерархии, – уровень иерархии, – множество входных сигналов, – множество выходных сигналов, – множество управляющих сигналов с верхнего уровня иерархии, – множество управляющих сигналов на нижний уровень иерархии, – множество состояний (множество подмножеств множества матриц предсказания (см. далее)), – функция переходов, – 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 -ого выходного признака в -автомате удобно использовать набор булевых матриц предсказания , в которых каждый столбец является вектором предсказания входных признаков в момент времени , где – начало вычислительного цикла (момент действия управляющего сигнала ). Сама матрица задаёт последовательность битовых векторов, наличие бита в котором свидетельствует о присутствии распознаваемого функцией признака. Алгоритм вычисления функции переходов и выходной функции по начальному моменту времени , управляющему воздействию и входному воздействию представлен на рис 1.

Введение такого автомата и некоторых соотношений на множестве -автоматов позволяет определить все компоненты знака. Так, образом знака , соответствующего признаку , будет называться такое подмножество признаков, что . Здесь отношение является отношением измеримости одного признака с помощью другого. Введение выделенных признаков–маркеров эффекта и условия ведет к следующему определению значения: если – признак, соответствующий знаку , - процедурный признак, измеряющийся с помощью признаков–маркеров условия и эффекта, , то будем называть элементом значения признака . Отношение показывает, что признак сопутствует признаку-маркеру условия в матрице предсказания признака . Наконец, введение выделенного подмножества личностных признаков приводит к определению личностного смысла: если – признак, соответствующий знаку , - процедурный признак, , , то будем называть элементом личностного смысла признака .

* 1. Self-organized processes

On the sets of sign components specific relationships are occurred within the process of the actor activity. In its turn it leads to formation of world model of the actor. As a model of the actor’s world model three types of semantic networks were used. These are the network based on the set of sign image, the network based on the set of sign significance and the network based on the set of personal meanings. Self-organized processes on these networks involve as well the supplementation of the relationships’ collection as the formation of new nodes of the network which corresponds to the formation of a new element of individual knowledge.

Process of the formation of new sign includes the establishing connections between sign components and the naming generated structure. Until the name is not obtained this structure is called protosign and its components are called as percept evolved into sign image, functional significance evolved into sign significance and biological meaning evolved into personal meaning after sign formation completion. Common schema of the new sign formation:

1. The formation of percept.
2. Порождение на основе прошлого опыта или на основе прецедентов - множества пар вида «перцепт - функциональное значение» - функционального значения объекта.
3. Получение субъектом из культурной среды, аккумулированной в системе есте- ственного языка, пары «имя знака – значение» и оценка специальным меха- низмом степени близости функционального значения, построенного на стадии 1 к значению, полученному из культурной среды; в случае недостаточной бли- зости - переход к п. 1 и продолжение формирования перцепта.
4. Связывание имени из пары «имя знака - значение» с перцептом, построенным после завершения выполнения п. 1–3; с этого момента перцепт превращается в образ.
5. Формирование личностных смыслов знака на основе прецедентов действий с предметом.
6. Связывание имени из пары «имя знака – значение» со сформированным лич- ностным смыслом. С этого момента функциональное значение превращается в значение, а биологический смысл - в личностный смысл.
7. Продолжение отображения «биологический смысл – перцепт» включением в область определения отображения личностного смысла, полученного в преды- дущем пункте, а в область значений – образа из п. 4.

Рассмотрение процедурных признаков в виде правил с определенными множе- ствами добавляемых и удаляемых признаков позволяет сформировать алгоритм основного итерационного процесса (пп. 1-3 из вышеприведенной схемы) образова- ния знака с помощью -автоматов (см. рис. 2). Для определения конфликтности и применимости правил на множестве процедурных признаков введены специальные операции приведения: сохраняющего приведения столбца к множеству признаков () и сужающего приведения двух столбцов ().

1. Details of organization of tactic level
2. Details of organization of reactive level 7 Conclusion

В последнее время наблюдается повышенный интерес к автономным летательным

аппаратам вертолетного типа. Исследователями было предложено множество ар-

хитектур систем управления такими аппаратами. Большая сложность реализа- ции автономных вертолетов приводит к тому, что двухкомпонентная архитектура систем управления, состоящая из делиберативного и реактивного уровней, стано- вится неэффективной и появляется необходимость явного выделения иерархичной трехуровневой архитектуры, содержащей стратегический, тактический уровни и уровень управления.

На стратегическом уровне осуществляется высокоуровневое планирование, в ходе которого стоится последовательность действий, решающих поставленную пе- ред автономным летательным аппаратом задачу. Этот уровень является наименее проработанным, и существующие подходы обладают существенными недостатка- ми. Преодоление основной трудности – проблемы автономного целеполагания – может быть достигнуто с помощью создания такого представление знаний, в ко- тором описание действий с понятием, связи этого понятия с другими понятиями и процедуры выделения этого понятия из сообщений с нижележащего уровня управ- ления представляли собой одну единицу знаний.

На тактическом уровне решаются задачи навигации БЛА и ключевой является задача построения траектории. Основная трудность, возникающая при решении последней, – громоздкость модели, описывающей трехмерную окружающую среду. Целесообразным способом преодоления указанной трудности является использо- вание эвристических и декомпозиционных алгоритмов планирования.

На уровне управления основной задачей является построение регуляторов и наиболее перспективно развитие методов синтеза нелинейных робастных регуля- торов с гладким управлением, обладающих строгим математическим обоснова- нием. Для улучшения работы полученных регуляторов возможно их совместное применение с механизмами адаптации (асимптотические наблюдатели, методы ИИ и др.), не нарушающих найденные условия устойчивости замкнутого контура.

Разработанная архитектура позволяет решать большой спектр задач управ- ления коалициями сложных технических объектов в динамической среде и будет использована для создания экспериментального образца программного обеспече- ния многоуровневой системы управления на следующих этапах работ по проекту.