\title{Планирование поведения интеллектуального агента со знаковой картиной мира} Планирование поведения является важной функцией любой интеллектуальной системы управления сложным техническим объектом. В настоящее время в символьной парадигме искусственного интеллекта предложено большое количество различных алгоритмов планирования, в том числе и использующих прецедентную информацию, т.е. опирающихся на приобретенные знания. Однако проблема символизации (обоснования символов) в существующих способах представления знаний не позволяет эффективно использовать разработанные алгоритмы совместно с механизмами обучения при решении широкого спектра прикладных задач реальными интеллектуальными агентами (робототехническими системами). В настоящей работе представлен оригинальный алгоритм планирования (MAP-планировщик), который в качестве основы для приобретения и сохранения знаний, используемых в дальнейшем при планировании поведения, использует знаковую картину мира. В знаковой постановке задачи планирование является когнитивной функцией реализуемой картиной мира субъекта деятельности. Знаковая модель процесса планирования кроме решения проблемы символизации и обеспечения психологической и биологической правдоподобности, позволяет интеллектуальному агенту взаимодействовать с другими участниками при решении коалиционной задачи. В статье представлены описание используемого представления знаний, MAP-алгоритм планирования и модельный эксперимент в <<мире кубиков>>.

\textit{Ключевые слова}: планирование поведения, знаковая картина мира, образ, значение, личностный смысл, каузальная матрица, семиотическая сеть, MAP-алгоритм, планирование на основе прецедентов.

\section\*{Введение}

Вопрос разработки методов планирования поведения сложного технического или виртуального объекта имеет большую историю и в основном связывается с успехами отдельной области искусственного интеллекта - автоматического планирования. Здесь достигнуты существенные успехи - предложен ряд символьных методов планирования как в классической постановке задачи, когда действия детерминированы (такие алгоритмы планирования, как FF [1], FD [1], LAMA [1]), так и в недетерминированной постановке с учетом ненулевых вероятностей невыполнения действий и вероятностной реакции среды (алгоритмы на основе марковских процессов и динамического программирования [1]). Однако создание эффективных и быстрых алгоритмов планирования действий основывается на заранее заданных эвристических принципах поиска на графе и на предположении, что набор действий заранее известен, что делает невозможным автоматическую адаптацию системы планирования к новой задаче с новым списком действий. Это означает, что переноса опыта планирования с выделением абстрактных действий, которые могут иметь различную реализацию в разных ситуациях, в классических подходах не происходит. Существенные трудности возникают, когда существующие алгоритмы адаптируются для многоагентного случая, где предполагается, что агенты обладают как различными наборами действий, так и обладают различными знаниями о внешней среде [1]. В случае коалиционного взаимодействия также необходимо обязательное включение элементов обучения для пополнения базы данных одного агента по поступающей от других участников коалиции информации.

В последнее время исследователи в области управления и планирования уделяют повышенное внимание психологически и биологически правдоподобным моделям и архитектурам управления агентами [1]. Использование различных типов памяти (эпизодической, процедурной и др.) в когнитивных архитектурах нацеленно именно на задачу повторить биологические и психологические пути обмена и организации информации для решения таких задач как управление и планирование поведения. Это связано в первую очередь с тем, что повышающийся уровень сложности тех задач, в которых действуют робототехнические системы (агенты) требует от них большего уровня автономности, универсальности и гибкости, которую не могут обеспечить существующие методы и алгоритмы. Исследователи в области искусственного интеллекта снова обращаются к естественным примерам решения таких задач - к исследованию поведения человека и животных [1]. Психологически правдоподобные модели когнитивных функций, в том числе планирования, нацелены не только на то, чтобы повторить поведение человека в сложных, в том числе коалиционных, условиях, но и по возможности более полно удовлетворить существующим психологическим представлениям о функционировании психики человека. С одной стороны это может привести к повышению ресурсоемкости предлагаемых алгоритмов, но, с другой стороны, позволит реализовать новые возможности, которые раньше оставались вне круга решаемых проблем специалистами по планированию, например, возможности к целеполаганию, распределению ролей в коллективе. Идеи когнитивной психологии и раньше использовались в классическом планировании, но, в основном, в бихевиориостском ключе. Так идея в разделении множества действий на автоматические, быстро совершаемые, специфические и произвольные, обобщенные, подсказанное психологической теорией [1], нашла свое воплощение в иерархическом планировании, а идея сохранения опыта планирования - в прецедентном [1].

В когнитивной психологии имеется ряд направлении, изучающих феномен планирования, среди которых необходимо выделить три основных [1]: планирование как часть когнитивной схемы [1], планирование как метапроцесс [1] и планирование как часть деятельности [1]. В первом направлении для описания поведения человека используются когнитивные схемы. Например, перцептивная схема – это план сбора информации об объектах и событиях, получения новой информации, обеспечивающий ее непротиворечивую интерпретацию. Схема одновременно включает в себя и сам план, и исполнение плана, это структура действия, равно как и структура для действия. Во втором направлении предусматривается наличие метакогнитивных процессов, позволяющих человеку управлять своими когнитивными процессами и знаниями. С точки зрения Стернберга, можно говорить о глобальном (стратегическом) и локальном (тактическом) планировании. Глобальное планирование требует больших затрат времени, но это компенсируется уменьшением времени на локальное, тактическое планирование. Наконец, в третьем подходе, являющимся одним из наиболее общих, рассматривается иерархическая теория деятельности, которая используется в данной работе и описывается в следующем разделе.

Стоит отметить также, что психологически и биологически правдоподобные модели управления и планирования позволяют по-другому взглянуть на проблему символизации (symbol grounding problem) [1]. Нейрофизиологические модели функционирования сенсорных отделов коры головного мозга в купе с психологической теорией категоризации и восприятия служат основой для построения новых непротиворечивых моделей привязки символов к сенсорным данным. Успехи в данном направлении позволили реализовать некоторые модели в робототехнических системах [1].

В настоящей работе будет представлен новый психологически и биологически правдоподобный метод планирования поведения, основанный на знаковой теории деятельности и моделях строения кортикально-таломических отделов коры головного мозга. Помимо своей ценности с точки зрения моделирования когнитивных функций человека знаковый подход может быть использован при решении ряда коллективных робототехнических задач (например, для задача интеллектуального перемещения [1]), не решаемой классическими и другими психолого ориентированным методами (такими как BDI [1]).

Далее статья организована следующим образом. В главе [2] вводятся основные понятия, используемые в статье: даны определения картине мира, знаку и его компонентам с психологическими и нейрофизиологическими обоснованиями. В параграфе [2] вводится понятие каузальной матрицы как математические структуры для описания компонент знака, рассматриваются ее основные характеристики. В параграфе [2] исследуются сети, формируемые на основе множеств каузальных матриц и моделирующих отношения на компонентах знака. В главе [2] вводится понятие семиотический сети как модели картины мира, рассматриваются основные типа процессов распространения активности по семиотической сети. В главе [2] дано описание MAP-алгоритма планирования поведения в знаковой картине мира (на семиотической сети). В заключение, в главе [2] приведен модельный пример работы представленного MAP-планировщика.

\section{Знаковая картина мира}

В качестве способа представления знаний в настоящей работе используется модель знаковой картины мира [1], которая не только хранит знания об объектах, процессах и отношениях внешней среды, но также представляет внутренние параметры интеллектуального агента, определяющие его мотивационную составляющую и опыт действования. Картина мира также включает в себя процедуры оперирования со знаниями: их приобретение и использование в различных процессах, таких как восприятие, рассуждения, целеполагание, планирование поведения[1]. Модель картины мира строится на основе психологических представлений о функционировании психики человека, в частности на представлениях культурно-исторического подхода [1], теории деятельности [1] и теории дуальных систем [1]. В соответствии с психологическими воззрениями элементом картины мира является четырехкомпонентная структура - знак, которая представляет для субъекта (в нашем случае интеллектуального агента) все сущности внешней среды и внутреннего пространства: объекты, их свойства, процессы, отношения между объектами и процессами. Следует отметить, что знак является продуктом взаимодействия нескольких субъектов деятельности, образующих некоторую группу (культурную среду), т.е. понятие знака изначально предполагает работу картины мира индивида в кооперации с картинами мира других индивидов.

Образная компонента знака хранит характерные признаки представляемой сущности и одновременно является функцией построения представления этой сущности на основе потока данных, поступающих как с наружных, так и внутренних сенсоров, и в котором выделяются ключевые признаки. Образная компонента индивидуальна для каждого носителя картины мира и образуется в результате процесса наблюдения и обобщения [1].

Компонента значения знака представляет обобщенные, концептуальные знания субъекта о сущностях внешней среды, а также внутреннего пространства как себя, так и других участников группы. Эти знания являются согласованными, т.е. одинаковы у всех представителей группы. Коммуникативные процессы, которые протекают в группе субъектов (интеллектуальных агентов), в своей основе используют сообщения, которые строятся по общим для всех значениям знаков, задающих, таким образом, синтаксис протокола коммуникации.

Компонента личностного смысла знака содержит индивидуальный личный опыт взаимодействия субъекта с внешней средой с учетом отношения к этому опыту - послужил ли он достижению некоторой цели (удовлетворению некоторой потребности), или же наоборот, оказался неудачным. Личностный смысл знака является динамической его характеристикой, которая постоянно формируется и обновляется в результате протекания тех или иных когнитивных процессов (планирования, целеполагания). Именно компонента личностного смысла определяется внутренними характеристиками субъекта и его потребностно-мотивационной сферой.

Наконец, четвертая компонента знак - имя - служит для его идентификации как в коммуникативных процессах, так и в произвольных процессах планирования и рассуждений. Имя знака, как и его значение, является утвержденной, слабо меняющейся в группе субъектов компонентой знака.

Знаки представляет в картине мира субъекта как статические объекты и свойства внешней среды, так и динамические ее составляющие: процессы, ситуации - а также внутренние характеристики агента: действия, объекты и свойства <<внутренней среды>>. Пусть у нас есть объект внешней среды - \textit{лимон}. В картине мира некоторого субъекта он может представляться знаком с именем <<лимон>>, образ которого включает такие признаки как \textit{желтый цвет}, \textit{овальную форму} и \textit{кислый вкус}. Эти признаки также могут быть представлены в картине мира знаками, либо являться информацией, поступающей напрямую от сенсоров. Значением знака <<лимон>> будут являться те обобщенные действия и процессы, в которых по общему согласованному мнению некоторого коллектива, которому принадлежит субъект, участвует \textit{лимон}: лимон \textit{принято употреблять в пищу}, \textit{использовать как соус для рыбных блюд} или \textit{использовать для профилактики болезней}. Личностный смысл лимона для субъекта - это те конкретные персональные действия и процессы, в которых субъект имел опыт использования лимона, решая некоторую задачу: когда-то я \textit{кидал лимон в соседа по парте в школе} или \textit{сжевал целый лимон и не скривил лицо}. Все действия и процессы также могут быть представлены некоторыми знаками, либо не выводиться на знаковый произвольный уровень и являться некоторыми не обозначаемыми операциями.

Кроме психологических оснований четырхекомпонентной структуры знака имеются нейрофизиологические свидетельства в пользу существования такой структуры хранения и активации элементов индивидуального опыта [1]. Кроме того, нейрофизиологические данные служат основной для построения моделей компонент знака и некоторых функций, таких как восприятие и распознавание [1]. Нейрофизиологические свидетельства в пользу высокой однородности строения различных отделов коры больших полушарий мозга, а также участия таламуса в формировании и запоминании временных последовательностей [1], приводят к используемой в данной статье математической структуре каузальной матрицы [1] для описания строения компонент знака.

Знаковый подход к представлению знаний и описание процессов, протекающих в знаковой картине мира позволяют решить ряд трудных задач в области ситуационного управления [1] и управления сложными техническими объектами [1]. Использование знаковой картины мира для реализации функций стратегического уровня управления робототехническими системами [1] демонстрирует применимость используемого подхода не только для представления знаний, но и для решения задач коалиционного планирования и распределения ролей.

\subsection{Компоненты знака}\label{subsec:components}

Рассмотрим структуру компонент знака на примере образной компоненты, которая участвует в распознавании (актуализации) знака, выделении представления об опосредуемом объекте или процессе на основе поступающей из внешней среды сенсорной информации и регистрируемой внутренними сенсорами моторной информации. До именования знак будем называть протознаком или признаком.

Предположим, что во входном потоке данных выделена последовательность  длины  векторов действительных чисел от 0 до 1, которые будем называться \textit{событиями}. Каждое событие  длины  представляет собой запись выходов от  сенсоров, а каждый элемент события означает уверенность в срабатывании данного сенсора. Например, событие  поступает с трех сенсоров - датчиков красного, синего и зеленого света - и означает, что уверенность в срабатывании датчика красного света составляет 10\%, а синего и зеленого - по 90\%.

Образная компонента знака должна по входной последовательности данных определить, присутствует ли (закодирован ли) опосредуемый объект или процесс в этой последовательности. Для этого мы будем кодировать характерные признаки объекта или процесса в специальной структуре - каузальной матрице  размерности  на , где  - размерность входных событий, а  - длина последовательности входных событий. При этом каждый столбец  каузальной матрицы является битовым вектором длины  и кодирует те признаки (которым соответствуют 1), которые необходимо должны присутствовать во входном событии в момент времени , чтобы опосредуемый объект или процесс мог быть распознан во входном потоке данных, т.е. задают множество одновременных характерных признаков. Например, образу знака , представляющему объект <<квадрат>>, может соответствовать каузальная матрица

где первая строчка является характеристическим вектором информации с датчика углов на изображении, вторая - с датчика положения визуального сенсора (верхнее положение), третья - нижнее положение сенсора, четвертая - левое положение сенсора, пятая - правое положение (см. рис.[2]).

Образу каждого знака может соответствовать несколько каузальных матриц, которые задают различные проявления представляемого объекта или процесса. Весь кортеж каузальных матриц образа знака  будем обозначать как .

Случай, когда характерными признаками образа данного знака выступают данные с сенсоров, является частным. В более общей постановке, признаками для образа знака служат другие знаки, которые представляют эти характерные признаки. Таким образом, мы можем сопоставить образу знака  множество  мощности , каждому элементу которого соответствует номер строчки каузальной матрицы  размера  на , т.е. каждому признаку  соответствует характеристический битовый вектор, задающий на местах 1 те моменты времени, когда данный признак должен присутствовать во входных данных, чтобы успешно актуализировать знак (распознать образ знака) .

Для уточнения определения множества  введем семейство бинарных отношений , определённых на декартовом произведении . Будем считать, что знак  является \textit{элементом образа} знака ,  или , в том случае, если . Если известно, что знаку  соответствует 1 в -м столбце некоторой каузальной матрицы  знака , то мы будем использовать вложенное отношение .

\subsection{Каузальная сеть}

Введем специальную процедуру , которая каждому кортежу каузальных матриц  образа знака  ставит в соответствие два не пересекающихся подмножества индексов собственных столбцов  (индексы столбцов условий) и  (индексы столбцов эффектов): . Например, если для множества матриц  процедура  выдает два множества  и , то это означает, что появление признака, соответствующего первой строчке матрицы, вызывает появление признака, соответствующего второй строчке. Процедура  по сути является функцией установления причинно-следственного отношения на множестве входных событий и может реализовываться различными способами, в т.ч. на основе алгоритмов Норриса, FCbO, AddIntent ([1])

В том случае, когда для матриц  образа знака  множество столбцов эффектов пусто , т.е. когда по данному множеству каузальных матриц не возможно однозначно определить, какие события всегда предшествуют другим, мы будем считать, что причинно-следственная связь не установлена и знак опосредует некоторый объект или ситуацию. В противном случае будем считать, что знак опосредует некоторое действие или процесс, результат которого кодируется в столбцах эффектов, а условие - в столбцах условий.

Справедливы следующие утверждения относительно свойств процедуры :

\begin{itemize}

\item  --- столбец матрицы предсказания не может быть одновременно и условием и эффектом,

\item  --- столбец матрицы предсказания является либо условием либо эффектом,

\item  --- среди столбцов матрицы предсказания должен быть хотя бы один столбец условий, в то время как эффектов может и не быть (в случае объектных признаков),

\item  --- все условия предшествуют эффектам по времени.

\end{itemize}

Схема каузальной матрицы, с учетом выше сказанного, приведена на рис. [2].

Теперь введем понятие каузальной сети, которая будет определять гетерархию на множестве образов. Каузальная сеть  - является помеченным ориентированным графом, в котором

\begin{itemize}

\item каждому узлу  ставится в соответствие кортеж казуальных матриц  образа некоторого знака , что будем обозначать как ;

\item ребро  принадлежит множеству ребер графа , если  и , т.е. если знак  является элементом образа знаком ;

\item каждому ребру графа  ставится в соответствие метка  - кортеж трех натуральных чисел:

\begin{itemize}

\item  - индекс исходной матрицы в кортеже , может принимать специальное значение 0, если исходными могут служить любые матрицы из кортежа;

\item  - индекс целевой матрицы в кортеже , строка которой ставится в соответствие признаку ;

\item  - индекс столбца в целевой матрице, в которой в соответствующей признаку  строке стоит 1, может принимать положительные значения (столбцы условий) и отрицательные (столбцы эффектов).

\end{itemize}

\end{itemize}

Каузальная сеть представляет собой некоторое множество пересекающихся иерархий знаков. Каждый знак представлен множеством каузальных матриц, задающих образ этого знака, а иерархия представляет иерархические связи между образами. Такую связь можно читать как <<знак  участвует в формировании образа знака >>. При этом мы специфицируем для какой именно матрицы знака  и какого именно столбца этой матрицы нужен знак  (метки  и  соответственно). В некоторых случаях мы также можем указать и участвующую в процессе формирования образа матрицу знака  (метка ). Пример такой сети изображен на рис. [2].

Аналогичным образом определяются каузальные сети для остальных компонент знака - для значения и личностного смысла. Для каждого знака  задаются множества  и , т.е. определяются семейства отношений  и . Множество  интерпретируется как ролевой состав знака , например, элементы подкласса или роль действия. Множество  интерпретируется как мгновенный компонентный состав некоторой ситуации, наблюдаемой и переживаемой субъектом, носителем картины мира, в настоящее время. Аналогично определяются множества , , процедуры  и .

\section{Семиотическая сеть}

Знаком  будем называть четверку , где  - имя знака,  - образ знака, кортеж каузальных матриц , соответствующий узлу  каузальной сети на образах;  - значение знака, кортеж каузальных матриц , соответствующий узлу  каузальной сети на значениях,  - личностный смысл знака, кортеж каузальных матриц , соответствующий узлу  каузальной сети на смыслах.

Будем называть \textit{семиотической сетью} пятерку , где

\begin{itemize}

\item  - соответственно каузальные сети на множестве образов, значений и личностных смыслах,

\item  - семейство отношений на множестве знаков, сгенерированных на основе трех каузальных сетей, т.е. ,

\item  - семейство операций на множестве знаков, которые генерируются на основе структуры фрагментов трех типов каузальных сетей, к которым принадлежат соответствующие компоненты знаков (подробнее см. [1]).

\end{itemize}

Еще раз отметим, что знак представляет не только объекты внешнего мира, но также процессы, протекающие в нем, выполнимые действия, а также ситуации, наблюдаемые во внешней среде.

Три типа каузальных сетей, составляющих семиотические сеть, не независимы друг от друга. Между узлами каждой сети установлено взаимно-однозначное соответствие: для каждого узла  сети  найдутся единственные узлы  и  в сетях  (), такие, что все три узла соответствуют одному и тому же знаку . Имя знака служит меткой узлов в каждой сети: в каузальной сети может быть только один узел с данной меткой, а узлы всех сетей с одинаковыми метками образуют компоненты знака. Для связи каузальных матриц различных типов узлов в рамках одного знака служат специальные функции связывания:  и обратные им  [1]. Каждая функция связывания ставит каузальной матрице одного типа каузальную матрицу другого типа либо генерирует эту матрицу в том случае, если она отсутствует в соответствующем узле сети.

Введем понятия активности в семиотической сети и процесса его распространения. Введем некоторую метку активности для каузальных матриц сети  () и будем называть активным множество  матриц, обладающих этой меткой. Процесс распространения активности представляет собой изменение состава множества  с течением времени (каждый дискретный момент) и описывается для каждого типа каузальной сети своей функцией: . Процесс распространения активности является итерационным, т.е. на каждом шаге новый состав множества активных матриц порождается на основе предыдущего состава и зависит от матриц, туда входящих. В простейшем случае мы будем рассматривать такой процесс, в котором каждая матрица не влияет на ход распространения активности от другой матрицы и поэтому будем считать, что функции  принимают на вход одну активную матрицу и выдают новое подмножество активных матриц.

В связи с тем, что ребра каузальных сетей имеют направлением, будем различать распространение активности вверх по сети, когда используются исходящие от узла ребра (функции ), и распространение активности вниз по сети, когда используются входящие в узел ребра (функции ). В дальнейшем, при описании алгоритма планирования, нам понадобятся только функции на сети значения и личностных смыслов. Каждую функцию  будем параметризовать глубиной распространения активности , которая указывает на какую глубину просматриваются ребра в данном направлении (вверх или вниз).

В дальнейшем при описании алгоритма планирования будет использоваться понятие фрагмента казуальной сети. Под фрагментом  мы будем подразумевать некоторое множество узлов  сети  вместе со всеми ребрами  их связывающими:  и .

\section{Планирование в знаковой картине мира}

Процесс планирования в знаковой картине мира реализуется с помощью MAP-алгоритма и идет в обратном направлении: от конечной ситуации к начальной. Кратко опишем основные этапы его работы. На вход алгоритма поступает описание задачи



где  - идентификатор задачи,  - множество знаков семиотической сети,  - начальная ситуация со смыслом ,  - целевая ситуация со смыслом . В общем случае задача  является результатом процедуры <<означивания>> - формирования картины мира по исходным описаниям домена планирования , задающему списки возможных действий и типов объектов, и задачи планирования , включающей в себя определение стартовых условий и конечной цели (шаг [2]).

Результатом MAP-алгоритма является план  - последовательность длины  пар , где  - каузальная матрица некоторого узла сети на личностных смыслах, представляющая -ую ситуацию планирования, а  - каузальная матрица некоторого личностного смысла, представляющая применяемое в ситуации  действие. При этом ситуация  является результатом выполнения действия , в том смысле, который раскрывается далее при обсуждении алгоритма,  - каузальная матрица, соответствующая смыслу начальной ситуации,  - каузальная матрица, соответствующая смыслу целевой ситуации.

Процесс планирования является иерархическим и состоит из повторения MAP-итерации, включающей в себя четыре этапа (см. рис. [2]):

\begin{itemize}

\item \textit{S-этап} -- поиск прецедента совершения действий в текущей ситуации,

\item \textit{M-этап} -- поиск применимых действий на сети значений,

\item \textit{A-этап} -- генерация личностных смыслов, соответствующих найденным значениям,

\item \textit{P-этап} -- построение новой текущей ситуации по множеству признаков условий найденных действий,

\end{itemize}

Кратко, MAP-алгоритм осуществляет итеративную генерацию новых каузальных матриц  личностных смыслов на основе текущей активной матрицы  до тех пор, пока не будет достигнуто предельное количество шагов  (шаг [2]) или не будет целиком активирован начальная матрица  (шаг [2]), соответствующей личностному смыслу  начальной ситуации. В качестве текущей активной каузальной матрицы для первой итерации выступает матрица, соответствующая личностному смыслу целевой ситуации  (шаг [2]). После завершения выполнения всех итераций, найденные планы сортируются по длине (шаг [2]) и самый короткий из них является решением задачи планирования в знаковой картине мира (шаг [2]).

Первым этапом в MAP-итерации является S-этап. Его суть заключается в том, что в картине мира интеллектуального агента производится поиск прецедентов, т.е. поиск действий, которые совершались в текущих условиях . Для этого просматриваются все знаки в картине мира  и их личностные смыслы  (шаги [2]--[2]). Если текущие условия  удовлетворяются матрицей , то список прецедентов  пополняется результатом распространения активности по сети личностных смыслов от знака  на расстояние  (шаг [2]).

Далее в MAP-алгоритме следует M-этап, на котором происходит распространение активности по сети личностных смыслов на расстояние  с целью активации всех знаков, связанных с текущей ситуацией (шаг [2]). Элементы полученного множества каузальных матриц  служат отправными точками для распространения активности по сети значений: для каждой матрицы  с помощью функции связывания  определяется необходимый узел на каузальной сети значений, от которого активность распространяется на расстояние  (шаг [2]). Если активированные матрицы являются каузальными, то они добавляются в множество активных значений  (шаг [2]).

Затем переходим к A-этапу, на котором происходит генерация каузальных матриц на сети личностных смыслов, которые представляют специфицированные относительно текущих условий  действия, определяемые активными значениями из множества . Для этой цели служат шаги [2]--[2], в которых распространение активности на каузальной сети значений на расстояние  приводит к активации множества значений  знаков, связанных с ролевой структурой процедурной матрицы , а затем с помощью функции связывания  происходит генерация новой каузальной матрицы на сети личностных смыслов, которая копирует значение  с замещением абстрактных знаков-ролей объектными знаками, связанными с ролями отношением класс-подкласс. Затем на A-шаге происходит отбор тех каузальных матриц, которые представляют действия, выполнимые в текущих условиях  (шаги [2]--[2]). Для этого удаляются все каузальные матрицы, эффекты которых не включены в текущую ситуацию (напомним, что планирование осуществляется в обратном направлении). В заключение A-этапа выполняется одна из операций в картине мира , осуществляющая в данном случае метарегулирование - проверку некоторой эвристики, которая может выражать, например, то правило, что нельзя повторять одинаковые действия, или лучше выполнить то действие, которое быстрее всего приближает к начальным условиям  (шаг [2]). Любое эвристическое правило также представимо в виде каузальной матрицы личностного смысла знака, представляющего внутреннюю стратегию планирования своего поведения.

Завершается MAP-алгоритм P-этапом. Здесь для каждой сгенерированной каузальной матрицы , представляющей некоторое действие, формируется новая ситуация , которая является результатом обратного применения действия в текущих условиях . Обратное применение (шаг [2]) заключается в формировании каузальной матрицы , состоящей из событий, являющихся либо колонками-условиями действия , либо принадлежащих текущей активной каузальной матрице и не являющихся колонками-эффектами действия . В текущий план  добавляется пара текущие условия - применимое действие . Если новая ситуация не покрывает стартовую ситуацию (шаг [2]), то итерации продолжаются с новой текущей ситуацией, пополняя все множество генерируемых планов .

Константы , которые определяют глубину распространения активности в каузальных сетях, являются параметрами алгоритма и задают внутреннюю характеристику носителя картины мира, различаясь от агента к агенту. Обычно в модельных экспериментах эти параметры не превышают 5.

\section{Модельный пример: мир кубиков}\label{sec:example}

Продемонстрируем работу представленного алгоритма планирования поведения с помощью модельного эксперимента, доменом планирования для которого выступает широко известный в области автоматического планирования пример <<мир кубиков>> [1]. Описание домена на языке PDDL [1] состоит из определения типа (\textit{blocks}), четырех предикатов (\textit{ontable}, \textit{clear}, \textit{handempty}, \textit{holding}) и четырех действий (\textit{pick-up}, \textit{put-down}, \textit{stack}, \textit{unstack}) (см. табл. [2]).

Приведем пример решения с использованием MAP-алгоритма следующей задачи планирования - построение башни из четырех кубиков, лежащих на столе (табл. [2]). Фрагмент каузальной сети на личностных смыслах, задающего каузальную матрицу смысла начальной ситуации с именем \textit{start}, приведен на рис. [2]. У каждого отдельного кубика (\textit{a}, \textit{b}, \textit{c}, \textit{d}) одна каузальная матрица в узле сети, в то время как для предикатов \textit{clear} и \textit{ontable} имеется по четыре матрице в узле, т.к. они принимают участие в событиях с разными кубиками. Например, матрицы знака \textit{clear} присутствуют в 1, 3, 5 и 7 столбцах матрицы знака \textit{start} одновременно с кубиками \textit{a}, \textit{b}, \textit{c}, \textit{d} соответственно, что означает, что на всех кубиках не лежат другие кубики.

На рис. [2] представлена целевая ситуация, в которой все четыре кубика составлены в башню: кубик \textit{d} находится на столе, кубик \textit{c} - на \textit{d}, \textit{b} - на \textit{c}, и, наконец, на самом верху - кубик \textit{a}. Предикат \textit{on}, который задает отношение <<находится на>> может быть представлен в виде процедурный каузальной матрицы, чтобы явно продемонстрировать несимметричность этого отношения, хотя использование объектной матрицы никак не влияет на результат. Здесь также от каждого кубика в ситуации участвует одна каузальная матрица, а предикат \textit{on} представлен в виде узла с тремя каузальными матрицами, т.к. участвует в матрице знака целевой ситуации \textit{goal} в различных столбцах с тремя различными кубиками.

На рис. [2] представлен фрагмент каузальной сети на значениях, представляющий собой элементы процедурной каузальной матрицы знака \textit{stack} и отношения <<класс-подкласс>> объектов-кубиков, класса \textit{block} и ролей в действии \textit{stack}: \textit{block?x} (аналог семантической роли <<объект>>) \textit{block?y} (аналог семантической роли <<директив>>). Здесь необходимо отметить, что метка  ребра  (индекс исходной матрицы узла, из которого исходит ребро ) в случае отношения <<класс-подкласс>> (\textit{a}\textit{block}, \textit{block}\textit{block?x}) принимает специальное нулевое значение, что означает, что исходной может быть любая казуальная матрица данного узла. Иными словами, роль \textit{block?x} может играть любой из кубиков \textit{a}, \textit{b}, \textit{c} или \textit{d}.

Рассмотрим этапы MAP-алгоритма: S, M, A и P-этапы - на первой итерации алгоритма. Рассмотрим простейший случай, когда наш интеллектуальный агент не накопил опыта действования в условиях данной задачи. В следствие этого на S-этапе множество прецедентов  будет пусто. С учетом того, что планирование осуществляется в обратном направлении, на первом M-этапе мы рассматриваем целевую ситуацию как текущую активную матрицу предсказания  и распространение от нее активности вниз по сети личностных смыслов будет активировать множество , совпадающее с фрагментом, изображенным на рис.[2]. В множество значений  попадут значения знаков, представляющих кубики \textit{a},\textit{b},\textit{c},\textit{d} - это все связанные с ними по сети значений процедурные знаки \textit{stack}, \textit{unstack}, \textit{pick-up}, \textit{put-down}. На рис. [2] слева представлен фрагмент каузальный сети на значениях, включающий процедурную матрицу знака \textit{unstack}. Для активации матрицы знака \textit{unstack} от матрицы знака \textit{a} достаточно использовать в качестве константы  значение в три ребра.

На A-этапе происходит генерация новых каузальных матриц  в сети личностных смыслов путем распространения активности вниз по сети значений. Пример такого распространения, в результате которого образуется новая каузальная матрица знака \textit{unstack}, представлен на рис. [2] справа. Новая каузальная матрица на сети личностных смыслов является копией соответствующей матрица на сети значений с заменой ссылок, указывающих на знаки-роли, на ссылки, указывающие на объектные не абстрактные знаки, представляющие кубики. В нашем примере будет сгенерирована матрица, соответствующая действию \textit{unstack}(\textit{a}, \textit{b}) - снять кубик \textit{a} с кубика \textit{b}. На данном этапе будет сформировано по четыре матрицы для одноместных действий и двенадцать - для двухместных.

В завершение A-этапа эффекты построенных процедурных матриц проверяются на применимость в условиях текущей ситуации и среди применимых действий отбираются те, которые удовлетворяют некоторому метакогнитивному правилу (эвристике) . В нашем примере, единственным применимым действием из всех сформированных вариантов будет действие \textit{unstack}(\textit{a},\textit{b}). В качестве эвристики может быть использовано жадное правило: выбираем те действия, которые максимально быстро приближают к успеху (новая ситуация имеет больше общих признаков с целевой).

В конце итерации, на P-этапе, генерируется новая каузальная матрица  в сети личностных смыслов знака, представляющего следующую ситуацию планирования. В нашем примере новая текущая ситуация будет совпадать с предыдущей за исключение того, что кубик \textit{a} теперь находится в манипуляторе, а на кубике \textit{b} теперь ничего не находится. В текущий план  добавляется пара  каузальных матриц текущей ситуации и выбранного действия. Т.к. новая ситуация не включает в себя стартовую ситуации начинаем новую итерацию.

В результате работы MAP-алгоритма в нашем примере будет получен план из 6 действий: \textit{pick-up}(\textit{c}), \textit{stack}(\textit{c},\textit{d}), \textit{pick-up}(\textit{b}), \textit{stack}(\textit{b},\textit{c}), \textit{pick-up}(\textit{a}), \textit{stack}(\textit{a},\textit{b}). В завершение работы агента над этой задачей он сохраняет прецедент планирования в своей картине мира: он сохраняет начальную и конечную ситуацию в виде новых знаков и образует новый процедурный знак, который можно назвать как <<построить башню>>. Единственным признаком в столбце условий данного знака будет начальная ситуация, единственным признаком в столбце эффектов - целевая ситуация. После этого интеллектуальный агент сможет решить ту же задачу, найдя на S-этапе необходимое действие, которое сразу приведет к цели. Такая же ситуация может возникнуть и в другой задаче по ходу ее решения, что приведет к сокращению пространства поиска подходящих действий.

\section\*{Заключение}

В классической символьной постановке задачи планирования в искусственном интеллекте возникает проблема совмещения символьных алгоритмов планирования с методами обучения, сохраняющими как опыт планирования, так и обеспечивающими адаптацию действий к новым условиям. Данная проблема смыкается с проблемой символизации - привязки используемых в классическом способе представления знаний символов к реальным объектам, процессам и свойствам внешней среды. Особенно остро данные проблемы проявляется при реализации обучаемых робототехнических систем, для которых важно сопоставлять символы, используемые при концептуальном планировании с данными, поступающими от сенсоров. При этом, когда перед сложной технической системой ставится задача планирования в довольно широком спектре условий, в том числе и коалиционных, подходы с заранее сформированной, хоть и пополняемой, базой знаний показывают свою неэффективность. Способ представления знаний, на котором базируются функции управления интеллектуальным агентом, должен изначально поддерживать возможность привязки символов к данным сенсоров и поддерживать как представление внутренней информации, так и обобщенной, согласованной с другими участниками коалиции информации. В настоящей работе эти задачи решаются с использованием знаковой картины мира. Представлен оригинальный метод планирования (MAP-алгоритм), который использует и сохраняет прецедентную информацию в процессе синтезе плана. Используемый четырехкомпонетный элемент картины мира (знак) позволяет кодировать не только информацию о внешней среде, но и внутренние характеристики и мотивационно-потребностные свойства, а так же общие коллективные знания. Представленный алгоритм также может быть использован и для составления коалиционных планов. Для демонстрации работы MAP-планирощика приведен модельный пример составления плана для одной из задач <<мира кубиков>>. Программная реализация и модельные эксперименты представлены в репозитории \href{https://github.com/cog-isa/map-planner}{https://github.com/cog-isa/map-planner}.