



## РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГРАММАМ СО РАН

В 2012 году завершены исследования по 7 проектам приоритетных направлений фундаментальных исследований по программам СО РАН на 2010–2012 гг.

**Приоритетное направление Ш.24. Теория систем, общая теория управления сложными техническими и другими динамическими системами, в том числе единая теория управления, вычислений и сетевых связей, а также теория сложных информационно-управляющих систем, групповое управление и распределенное управление.**

**Программа Ш.24.1. Теория управления динамическими системами и методы их исследования.**

**Проект Ш.24.1.1. Методы и вычислительные технологии исследования задач управления с приложениями к социальным, экономическим, природным и техническим системам.**

*№ гос. регистрации: 01201001349*

*Научный руководитель – д.ф-м.н. В.А. Батулин.*

Изучена задача оптимального импульсного управления с нестандартными фазовыми ограничениями. Для случая, когда в качестве импульсных управлений выступают векторные меры, разработан метод преобразования на основе разрывной замены времени и сформулирована общая схема улучшения управления. Получен метод последовательных приближений для линейно-квадратичной задачи оптимального управления логико-динамической системой.

Для нелинейных динамических систем на плоскости, линейных по управляющим воздействиям, разработаны новые алгоритмы аппроксимации множества достижимости, основанные на методе стохастической аппроксимации. Разработаны параллельные варианты предложенных алгоритмов, ориентированные на кластерные вычислительные системы. Реализованы вычислительные технологии фазового оценивания для рассматриваемого класса задач, и проведены многовари-



антные вычислительные эксперименты, подтвердившие высокую эффективность реализованных алгоритмов.

Для нелинейной задачи оптимального управления с невыпуклыми терминальными функционалами разработаны алгоритмы поиска глобального экстремума, ориентированные на кусочно-линейные и релейные типы управляющих воздействий. Алгоритмы реализованы в вариантах для однопроцессорных и многопроцессорных вычислительных систем. С использованием реализованных алгоритмов численно исследован ряд задач оптимального управления в модельных системах, содержащих значительное количество локальных экстремумов целевого функционала.

Выполнена стандартизация сформированной коллекции тестовых невыпуклых задач оптимального управления. Разработан расширенный шаблон представления постановки и решения задачи, включающий информацию о виде управляемой системы и оптимизируемых функционалах, оптимальных решениях, известных локальных оптимумах и множестве достижимости системы. Проведена верификация решений задач коллекции с применением нескольких разнородных методов оптимизации: алгоритма случайного мультистарта, алгоритма криволинейного поиска, туннельного алгоритма, алгоритма Шепарда, генетического алгоритма и других. Коллекция пополнена новыми задачами, как модельными, так и содержательными.

Для задачи оптимизации в квантово-механических системах разработаны специализированные алгоритмы поиска оптимальных решений, ориентированные на нахождение глобально оптимальных процессов. Для статических задач поиска минимума потенциальных функций реализован набор локальных алгоритмов оптимизации, основанный на методе сопряженных направлений. Для поиска глобального экстремума предложена вычислительная технология решения, комбинирующая локальный спуск с глобализующей методикой двухслойной выборки стартовых приближений. Для задач оптимизации динамических квантово-механических систем предложена технология решения, включающая этап генера-



ции устойчивого начального приближения, этап прохождения овражного участка процесса и этап уточнения экстремума.

Рассматривались задачи оптимального управления в системе с распределенными параметрами типа Гурса–Дарбу, которые возникают, например, при изучении процессов сорбции и десорбции газов, а также процессов сушки. Для линейной управляемой системы уравнений гиперболического типа общего вида получена интегральная форма решения этой системы при произвольном распределенном управлении – аналог формулы Коши в обыкновенных уравнениях. При этом начальные условия могут быть определены как в виде фиксированных функций, зависящих от одной переменной ( $t$  или  $x$ ), так и в виде решений задачи оптимального управления в обыкновенной системе дифференциальных уравнений. Далее рассматривается задача о нахождении оптимального распределенного управления, обеспечивающего наименьшее среднеквадратическое отклонение решения системы Гурса–Дарбу от нулевого состояния (или от некоторого заданного в виде функции от пространственной переменной). Для поиска численного решения этой задачи построен алгоритм, основанный на теореме об отделимости и на теореме о минимаксе. При этом поставленная задача сводится к поиску максимума некоторого вогнутого функционала, определенного на классе функций от одной переменной.

В развитие многометодной технологии численного решения задач оптимального управления с ограничениями на фазовые координаты изучен подход, основанный на редукции к конечномерной задаче оптимизации и конструктивно учитывающий фазовые ограничения путем применения эффективных алгоритмов линейного и нелинейного программирования для решения вспомогательных задач большой размерности. На внешних итерациях этого метода решаются задачи минимизации специально сконструированного нелинейного функционала при линеаризованных на полученном приближении фазовых ограничениях. Показано, что современные информационные технологии и многопроцессорная вычислительная техника допускают достаточно эффективную реализацию сложных многоуровне-



вых алгоритмов путем применения параллельных вычислений и многометодной технологии для расчета оптимального управления.

Для алгоритма, основанного на локальных аппроксимациях множества достижимости управляемой дискретной системы, доказана теорема о релаксационности.

Исследована задача о размещении нескольких логистических центров на полигоне обслуживания в непрерывной постановке, т.е. в случае, когда как потребители, так и логистические центры могут располагаться не в некоторых наперед заданных местах, а в любой точке полигона обслуживания. Данная задача сведена к задаче вариационного исчисления специального вида, для ее решения предложен многоэтапный метод сегментации, основанный на аналогии между отысканием глобального минимума интегрального функционала и распространением света в оптически неоднородной среде (оптико-геометрическая аналогия). Метод обеспечивает последовательную сегментацию логистических зон и определение места расположения обслуживающего центра в каждом выделенном сегменте. Проведен вычислительный эксперимент для полигонов обслуживания в виде правильных многоугольников, установлено хорошее соответствие теоретических и численных решений.

Исследована задача об оптимальной прокладке маршрута с учетом ограничений на кривизну и перепад высот. Для данной задачи предложен численный метод, основанный на оптико-геометрической аналогии при наличии точечного источника света. Проведено тестирование метода на серии модельных задач, решена задача о прокладке высокоскоростной железнодорожной магистрали по маршруту Екатеринбург-Челябинск.

Разработаны технологии расчета малочувствительных к ошибкам входных данных программных управлений рабочими режимами орбитального телескопа, и осуществлена высокоточная стабилизация полученных траекторий по обратной связи. Получена модификация алгоритма расчета программного управления для задачи наведения нежесткого телескопа, учитывающая динамику двигателей-



маховиков с дискретным (цифровым) управляющим сигналом. Выполнены вычислительные эксперименты, основанные на проектных данных орбитального телескопа "Спектр-УФ". Разработан алгоритм структурной и параметрической идентификации модели космического аппарата по телеметрическим данным, отвечающим неуправляемому движению.

Получен новый необходимый критерий разрешимости дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) в частных производных с постоянными матрицами коэффициентов первого порядка. Под ДАУ в частных производных понимаются системы дифференциальных уравнений с особенными матрицами в области определения при производных искомой вектор-функции. Частным случаем ДАУ в частных производных являются системы, содержащие взаимосвязанные уравнения в частных производных, обыкновенные дифференциальные уравнения по одной из переменных (остальные переменные входят как параметры), алгебраические (конечные) уравнения. Предполагается, что пучок матриц, задающих систему, регулярен. Доказана лемма о том, что система с регулярным пучком имеет по крайней мере одно решение в виде многочлена, если свободный член является многочленом. С помощью этой леммы в предположении об определенном виде характеристического многочлена выписан явный вид общего решения. Получены условия совместности начальных условий с системой.

Рассмотрена математическая модель, описывающая нестационарные гидравлические цепи с регуляторами, работающими по принципу обратной связи. При определенных предположениях о начальных данных доказаны локальная и глобальная разрешимость начальной задачи для системы интегро-дифференциальных уравнений, задающих модель. Предложено эквивалентное преобразование исходной системы, позволяющее применять численные методы высокого порядка к преобразованной системе.

Найдены условия существования решения систем интегро-дифференциальных уравнений с вырожденной матрицей при производной. Исходной системе ставится в соответствие некоторый многопараметрический мат-



ричный пучок. На основе анализа свойств этого пучка делаются заключения о разрешимости исходной задачи.

Для численного решения интегро-алгебраических уравнений (ИАУ) Вольтерра построены многошаговые разностные схемы, основанные на квадратурных формулах Адамса. Под ИАУ понимаются системы интегральных уравнений Вольтерра с особенной в области определения матрицей при главном члене. Выписаны характеристические многочлены, соответствующие различным вариантам разностных методов, и указаны области параметров, в которых эти разностные схемы обладают свойством А-устойчивости.

Предложен метод построения коллокационно-вариационных сплайнов для численного решения ДАУ. На этой основе построены разностные схемы. Сплайн должен удовлетворять в точках сетки ДАУ и иметь минимальную норму в некоторых пространствах Соболева. Получены условия сходимости соответствующих разностных схем при решении некоторых классов дифференциально-алгебраических уравнений высокого индекса. С помощью преобразования подобия матричных коэффициентов сплайн-коллокационных разностных схем, а также с учетом свойств самих схем было показано, что при положительных значениях параметра разностной схемы собственные значения матричных коэффициентов принадлежат кругу единичного радиуса.

Построена математическая модель по схеме нестационарного процесса многокомпонентного и многостадийного распада органических веществ с учетом процессов сорбции–десорбции и кинетики процессов в аэробных и анаэробных условиях. Дана оценка влияния сезонности изменения внешних факторов на направленность процессов обмена в системе «вода-дно». Определены условия идентификации параметров математической модели вторичного загрязнения. Проведена идентификация модели нестационарных массообменных процессов в пограничных слоях естественных водоемов с подвижными границами по данным измерений.

Получены магистральные решения при максимизации дохода предприятий и минимизации ущерба медико-экологическому состоянию региона для различных



видов штрафной составляющей критерия. Для технологии формирования медико-эколого-экономических моделей разработан алгоритм построения квазиоптимизационного сценария, основанного на приближенном магистральном решении.

Получены характеристические условия существования нелинейной дифференциальной реализации с минимальной операторной нормой континуального семейства управляемых (программно-позиционно) динамических процессов (бихевиористической системы Я. Виллемса) в классе квазилинейных нестационарных дифференциальных уравнений в бесконечномерном банаховом пространстве.

### **Проект Ш.24.1.2. Нелокальные методы в теории управления динамическими системами.**

*№ гос. регистрации: 01201001345*

*Научный руководитель – д.ф.-м.н. В.А. Дыхта.*

Получена задача сравнения для неклассической линейно-квадратичной задачи оптимального управления. Задача сравнения существенно проще исходной и получена в рамках развиваемой нестандартной двойственности с производящими функциями. В частности, она не содержит в функционале квадратичной формы по фазовым переменным, а при отсутствии формы по управлениям сводится к уже изученной (в рамках проекта) билинейной задаче оптимального управления.

Получены необходимые и достаточные условия глобальной оптимальности для дискретных задач оптимального управления. Эти условия базируются на внешних и внутренних аппроксимациях множества соединимых точек системы с сильно слабо монотонными функциями типа Ляпунова.

Доказаны необходимые и достаточные условия глобальной оптимальности для задач оптимального управления с выпуклым интегральным целевым функционалом и полувывуклым функциональным ограничением-неравенством на траекторию. На их основе разработаны методы локального и глобального поиска для



задач оптимального управления линейной системой с выпуклым интегральным целевым функционалом.

Изучена динамика множеств достижимости при больших временах для линейных систем с интегральными ограничениями на управление из лебеговых пространств. Получены асимптотические формулы для множеств достижимости и их форм.

Поставлена обобщенная задача нормирования внешних воздействий для дискретных динамических систем. С использованием векторных разностных неравенств и вектор-функций Ляпунова (ВФЛ) получены достаточные условия свойства  $\lambda$ -технической устойчивости, составляющего основу задачи нормирования. Для квазилинейных систем разработана процедура построения ВФЛ и нелинейной системы сравнения, используемых для построения алгоритмов проверки свойства технической устойчивости. Рассмотрены примеры, демонстрирующие эффективность предлагаемых подходов.

Формализованы понятия сильной и слабой  $V$ -инвариантности замкнутого множества относительно импульсной управляемой системы с траекториями ограниченной вариации. Эти понятия адаптированы к неавтономности импульсной системы по «быстрому» времени, в котором происходит импульсная динамика. В отличие от введенных ранее формализаций предложенная симметрична для инвариантности в прямом и обратном времени. Доказаны критерии инвариантности в форме систем проксимальных неравенств типа Гамильтона–Якоби.

Разработано программное обеспечение, предназначенное для решения задач двухуровневой оптимизации с квадратичной выпуклой функцией на верхнем уровне в оптимистической и гарантированной постановках.

Разработан параллельный эвристический алгоритм для решения задачи о р-медиане, основанный на лагранжевой релаксации и субградиентной оптимизации. Метод позволяет решать задачи высокой размерности (с 1012 переменными). Разработан точный алгоритм отсечений для многогранника частично-целочисленной задачи о рюкзаке.



Разработан метод решения задач диспетчеризации железнодорожных составов, который был апробирован на задачах конкурса RAS problem solving competition 2012. По результатам презентации полученных результатов на ежегодном собрании INFORMS 2012 (<http://www.informs.org/Community/RAS/Problem-Solving-Competition/2012-RAS-Problem-Solving-Competition>) данная работа была удостоена второго приза.

Разработаны методы ускорения мултистарта с эллипсоидальными и параллелепипедными аппроксимациями областей притяжения локальных экстремумов для поиска минимума невыпуклой функции. Программные реализации предложенных алгоритмов позволяют адаптировать алгоритмы к конкретной постановке задачи путем настройки алгоритмических параметров. В зависимости от требований к решению можно либо повышать надежность достижения глобального экстремума, либо уменьшать вычислительные затраты. Проведенные многовариантные численные эксперименты подтвердили эффективность предложенных методов.

Предложен алгоритм поиска экстремума вырожденной унимодальной функции, основанный на генерации неравномерной адаптивной сетки. Реализована модификация алгоритма Чебышева, позволяющая получать решение с высокой точностью за счет применения третьих производных оптимизируемой функции.

Разработана вычислительная технология оптимизации, ориентированная на высокоточное решение аргументных экстремальных задач. Технология реализует на первом этапе стохастический поиск приближения к решению, на втором этапе – уточнение решения с применением редукции исходной задачи к задаче интегрирования системы дифференциальных уравнений («метод Коши»). Проведенные вычислительные эксперименты продемонстрировали возможность достижения рекордных результатов расчетов на стресс-тестовых задачах Розенброка и Нестерова.



### Проект Ш.24.1.3. Качественный анализ эволюционных уравнений и систем управления.

№ гос. регистрации: 01201001351

Научный руководитель – чл.-к. РАН А.А. Толстоногов.

Рассмотрена задача минимизации интегрального функционала с невыпуклым по управлению интегрантом на множестве решений управляемой системы с гистерезисом, описываемой двумя обыкновенными дифференциальными уравнениями. Построены гладкие аппроксимации для рассматриваемой проблемы и исследована вариационная устойчивость данной задачи минимизации.

Исследована модель, описывающая взаимодействие популяции и некоторых управляющих агентов в области, которая задается множеством достижимости некоторого (управляемого) дифференциального включения. Изучены вопросы существования стратегии управляющих агентов, которая позволяет удерживать популяцию в заданном ограниченном множестве в течение конечного или бесконечного отрезка времени (задача блокирования популяции).

Выделены классы линейных нестационарных и нелинейных систем дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), для которых, опираясь на известные результаты для систем в нормальной форме Коши со скалярным управлением, можно получить условия стабилизируемости. Предложено конструктивное преобразование линейной ДАУ с несколькими входами произвольно высокого индекса неразрешенности в систему ДАУ с одним управляемым входом. Доказана теорема о стабилизируемости линейных нестационарных ДАУ с несколькими управляемыми входами. Получены достаточные условия стабилизируемости по линейному приближению для нелинейных ДАУ с одним входом.

Для неавтономных дифференциальных включений предложено новое понятие предельных дифференциальных включений и изучены их свойства. Установлен аналог принципа инвариантности Ла-Салля с использованием функций Ляпунова со знакопостоянной производной.



Исследованы скольльзящие и импульсно-скользящие режимы управляемых систем, представленных в форме дифференциальных включений, при наличии в них обобщенных импульсных управляющих воздействий. Получено дифференциальное включение, которому удовлетворяет предельный импульсно-скользящий режим. Получены условия, при которых этот режим является обычным скольльзящим режимом для исходной системы, но с обычными разрывными позиционными управлениями релейного типа.

Для класса нелинейных квазипотенциальных систем (включающего модель вакуумного диода) найдены условия существования первых интегралов, линейных по скоростям. Показана представимость рассматриваемого класса моделей диода в гамильтоновой форме и обоснована интегрируемость на основании теоремы Лиувилля.

Построены алгоритмы выделения и анализа стационарных инвариантных множеств, основанные на использовании резонансных соотношений между первыми интегралами задачи и решении уравнений стационарности относительно части переменных и части параметров.

Проведен параметрический анализ устойчивости, неустойчивости, стабилизации и бифуркации множества относительных равновесий осесимметричного гиростата с постоянным вектором гиростатического момента на круговой орбите. Исследования выполнены с помощью программного комплекса *LinModel* и функций символьно-численного моделирования пакета компьютерной алгебры *Mathematic*.

Исследована устойчивость вращения вокруг вертикальной наименьшей главной оси тяжелого твердого тела с неравными моментами инерции в центральном поле сил (задача Бруна–Тиссерана). Исследованы предельные свойства экстремумов полиномов двух переменных.

Разработаны основанные на использовании сублинейных вектор-функций Ляпунова (ВФЛ) алгоритмы расчета непрерывных и дискретных управлений для стабилизации нестационарных программных движений нелинейных систем на за-



данном временном отрезке из условия минимизации ошибки конечного состояния. С использованием программной реализации этих алгоритмов в пакете "ВФЛ-РЕДУКТОР" проведен синтез двухрежимной маховичной системы прецизионной стабилизации большого космического телескопа типа "Спектр-УФ" с существенными упругими элементами конструкции, доля которых в общем тензоре инерции достигает 80%. Исследованы варианты использования в качестве исполнительных органов для выполнения программного управления как силовых гироскопов, так и инерционных маховиков. Показано, что за счет дополнительной стабилизации программных движений при гарантированном попадании в рабочую область (притяжения) основного режима точной стабилизации достигается существенное расширение диапазонов углов перенацеливания, допустимых уровней неопределенности параметров конструкции, ошибок начальных состояний и погрешностей расчета программного управления. Последнее, в свою очередь, позволяет сократить необходимое бортовое время вычисления программного управления.

Методом ВФЛ получены достаточные условия устойчивости и диссипативности квазилинейных непрерывно-дискретных управляемых систем с каскадными связями между подсистемами при асинхронном квантовании управления и измерений в различных подсистемах (в том числе с несоизмеримыми тактами).

Для квазимонотонных систем разрывных функционально-дифференциальных уравнений доказаны существование верхних и нижних обобщенных решений Матросова и теоремы о полунепрерывности экстремальных решений по начальным данным, правой части и параметрам (при условии интегральной полунепрерывности в смысле И. Гихмана).

Выделены классы линейных нестационарных и нелинейных систем ДАУ, для которых, опираясь на известные результаты для систем в нормальной форме Коши со скалярным управлением, можно получить условия стабилизируемости. Предложено конструктивное преобразование линейной ДАУ с векторным управлением произвольно высокого индекса неразрешенности в систему ДАУ с одним управляемым входом. В условиях существования такого преобразования доказана



теорема о стабилизируемости линейных нестационарных ДАУ с векторным управлением. Получены достаточные условия стабилизируемости по линейному приближению для нелинейных ДАУ с одним входом. Анализ проводится в предположениях, обеспечивающих существование структурной формы, в которой разделены «алгебраическая» и «дифференциальная» подсистемы.



**Приоритетное направление IV.29. Системы автоматизации, CALS-технологии, математические модели и методы исследования сложных управляющих систем и процессов.**

**Программа IV.29.1. Теоретические основы и методы информационных и вычислительных технологий проектирования и принятия решений.**

**Проект IV.29.1.3. Имитационные модели и информационные технологии автоматизации исследований и принятия решений при обеспечении техногенной безопасности.**

*№ гос. регистрации: 01201001347*

*Научный руководитель – д.т.н. А.Ф. Берман.*

Разработан и программно реализован метод извлечения знаний, базирующийся на анализе древовидных структур (деревья отказов и событий). Метод позволяет на основе понятий «механизм» и «кинетика» деградиационного процесса (ДП) посредством интервьюирования эксперта и анализа деревьев, описывающих кинетику процесса, извлечь знания и формализовать их в виде продукций, что обеспечивает возможности автоматизированного пополнения базы знаний о деградиационных процессах, систематизации и распространения знаний эксперта для решения задач диагностирования и прогнозирования технического состояния опасных объектов.

Алгоритм извлечения знаний (интервьюирования) представлен на рис. 5 и реализуется модулем формирования мастеров диалога. Пользователь выбирает объект исследования, используя информацию из базы данных опасных объектов. Указывает воздействующие факторы и наиболее значимые свойства объекта, описывает события деградиационного процесса. Этап описания кинетики ДП позволяет получить описание дерева событий.

Результатом работы алгоритма является xml-файл, который затем интерпретируется соответствующим модулем и позволяет заполнить заданные шаблоны правил. Структура xml-файла отражает информационные блоки диалога с экспер-



том. Новые понятия, введенные пользователем в процессе диалога, дополняют онтологию предметной области. Результаты работы модуля извлечения знаний транслируются на заданный язык машины вывода ЭС, что позволяет дополнять базу знаний ДП.

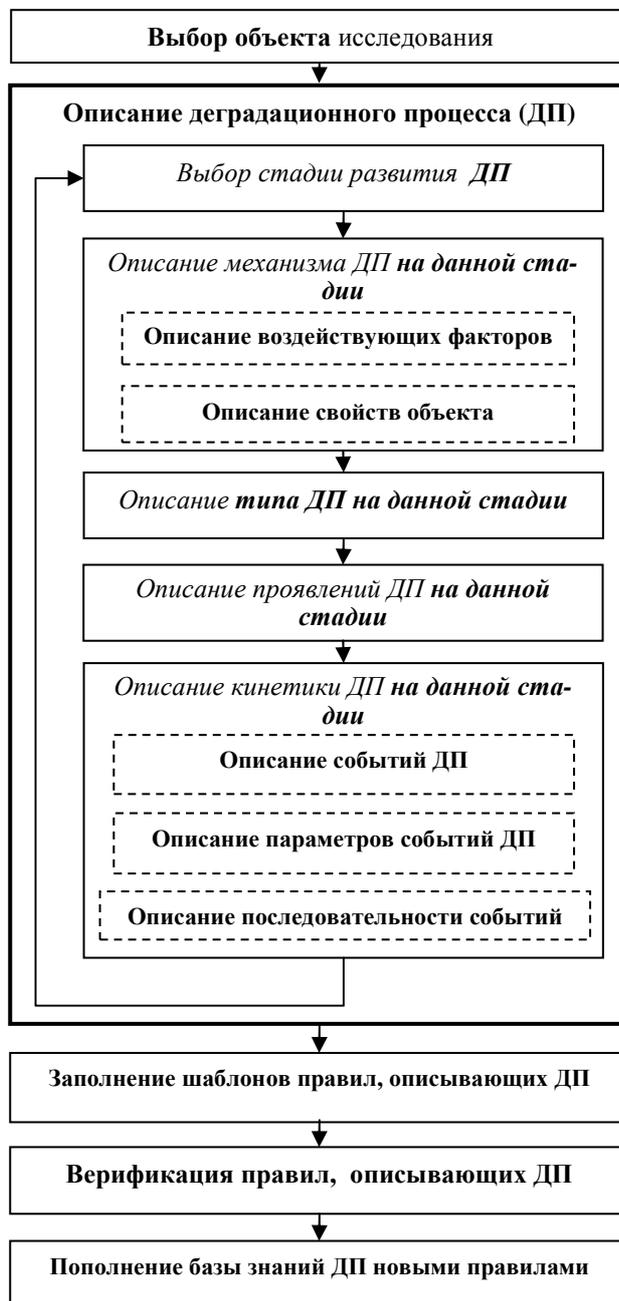


Рис. 5. Алгоритм извлечения знаний о деградационных процессах на основе интервьюирования эксперта



Разработан метод и осуществлена программная реализация системы автоматизированного формирования управляющих решений с использованием модифицированной сети Петри. Ранее предложенная сетевая модель дополнена новыми функциями:

$$NF = \langle P, T, M, MET, LEV, I, O, M_0 \rangle,$$

где  $P$  – множество позиций;  $T$  – множество переходов;  $M: P \rightarrow MET$  – маркировка сети, где множество меток  $MET$  определяется как совокупность векторов с указанием приоритета метки типа (цвета) метки и множества атрибутов, описывающих этот тип, с историей значений; входные дуги описываются входной функцией  $I$ , выходные дуги – выходной функцией  $O$ , которые включают алгебраические функции, определяющие метод вычисления значений атрибутов метки в позиции  $p$ , логические функции, определяющие условия выполнения перехода, функции разметки входных дуг, функции, описывающие взаимодействие уровней сети на входных и выходных дугах. Выходная функция также включает функцию прогнозирования значений атрибутов метки на основе предыдущих значений, особо необходимо отметить новые функции – функции управления, обеспечивающие переход из аварийного в безопасное состояние;  $LEV$  – функция, описывающая иерархические уровни сети;  $M_0$  – начальная разметка сети.

Предложенная модель модифицированной сети Петри и ее программная реализация в виде системы имитационного моделирования позволяют автоматизировать процесс поддержки принятия решений по выявлению и предупреждению аварийных состояний технических систем.

Разработана технология агентного моделирования динамики технического состояния объектов на основе онтологического, прецедентного, продукционного подходов и методов группового выбора, особенностью которой является применение разработанной имитационной модели для определения параметров текущего состояния агента и программная реализация базового агента, обеспечивающая хранение знаний о структуре агентов и их поведении во внешнем хранилище.

Этапы процесса моделирования предметной области показаны на рис. 6.

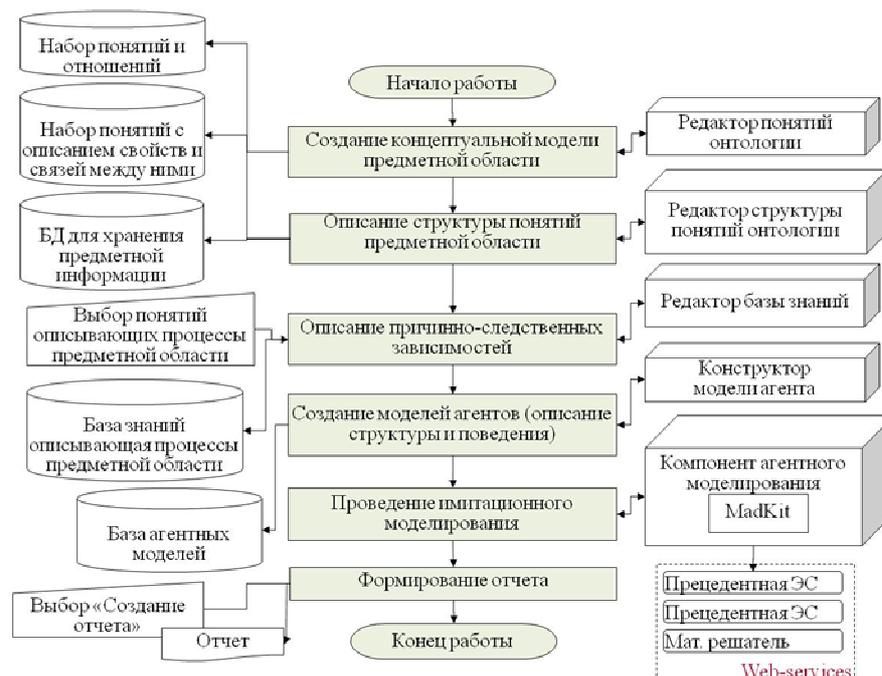


Рис. 6. Этапы процесса моделирования предметной области

Хранение всей информации (данных и знаний) осуществляется в едином «внешнем» хранилище, что обеспечивает отсутствие дублирования информации и обеспечивает взаимосвязь информации различных этапов процесса моделирования предметной области. Данный подход накладывает дополнительные требования к функциональности предлагаемой технологии. В качестве ядра системы предложено использовать существующую систему имитационного (агентного) моделирования MadKit (<http://madkit.net>).

Для решения задачи управления поведением агентов на основе «внешней» информации в выбранной системе MadKit разработан специальный класс на основе стандартного агента, обеспечивающий инициализацию структуры агента и управление процессом определения текущего состояния. Данный процесс определяется на основе заданной стратегии обращения к математическому, продукционному и прецедентному компонентам-решателям и состоит из этапов передачи параметров предыдущего состояния, передачи данных от датчиков (если есть) и информации от других агентов; вычисления текущего состояния агента; оценка необходимости изменения состояния агента в соответствии с моделью.

Компоненты-решатели системы моделирования реализованы в виде WebService'ов, что обеспечивает простоту масштабирования системы, а также их



самостоятельное использование. В целом система имитационного моделирования реализована в виде Web-приложения.

Предложенная технология агентного моделирования реализована в прототипе программной системы, который имеет архитектуру, представленную на рис. 7. Модуль визуализации результатов системы основан на механизме низкоуровневого доступа к СУБД, представлен математический компонент, расширена функциональность прецедентного компонента, описан продукционный компонент, для которого формализованы знания в виде продукций и реализован метод извлечения знаний о нежелательных процессах.

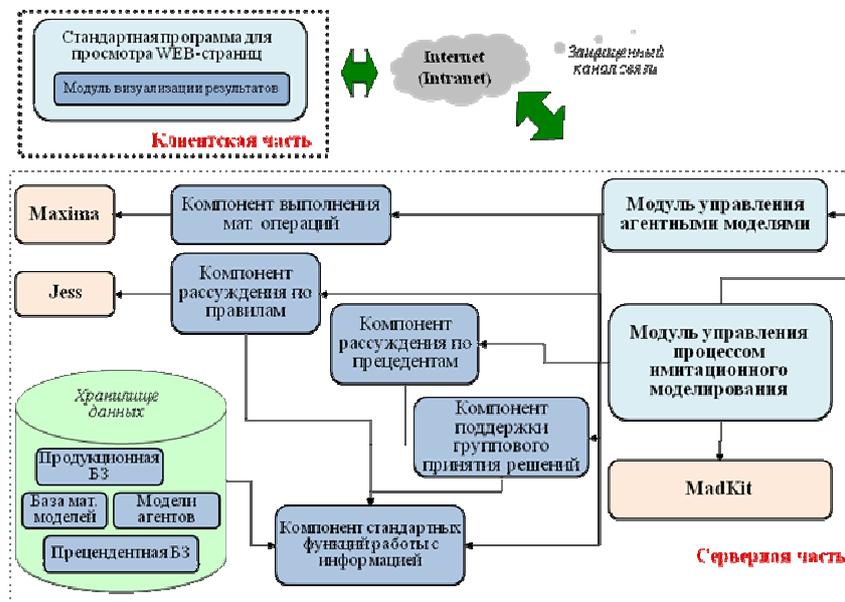


Рис. 7. Архитектура прототипа программной системы имитационного моделирования



**Приоритетное направление IV.31. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей. Развитие технологий GRID.**

**Программа IV.31.1. Фундаментальные основы и прикладные аспекты вычислительных и информационных технологий, в том числе технологий на базе GRID, в интегрированных информационно-телекоммуникационных системах и сетях.**

**Проект IV.31.1.2. Интеллектуальные методы автоматизации решения задач в параллельных и распределенных вычислительных средах.**

*№ гос. регистрации: 01201001348*

*Научный руководитель – д.т.н. Г.А. Опарин.*

Разработаны новые мультиагентные алгоритмы построения надежных распределенных планов решения задач и распределения разнородных вычислительных ресурсов на основе экономических механизмов регулирования их спроса и предложения. Применение разработанных алгоритмов в разнородной распределенной вычислительной среде позволяет существенно улучшить показатели надежности процесса решения задач, а также повысить коэффициент полезного использования ее вычислительных ресурсов.

Разработана подсистема PSM (Parallel System Monitor) ИК РЕБУС для управления параллельным решением SAT-задачи на основе гибридного метода (MPI+OpenMP), основными компонентами которой являются диспетчеры подзадач и процессов. PSM организует в главном процессе динамическую очередь подзадач, получаемых в результате расщепления исходной КНФ, применяет механизмы квантования времени и отложенных подзадач, порождает дочерние процессы, в которых запускаются расщепитель, препроцессор или солвер, запуск многопоточной реализации которого на SMP-узле дает преимущество, а иногда является единственно возможным вариантом получения решения по сравнению с однопоточной реализацией для задач большой размерности.



Рис. 8. Схема управления распределенными вычислениями в интегрированной кластерной системе ИДСТУ СО РАН

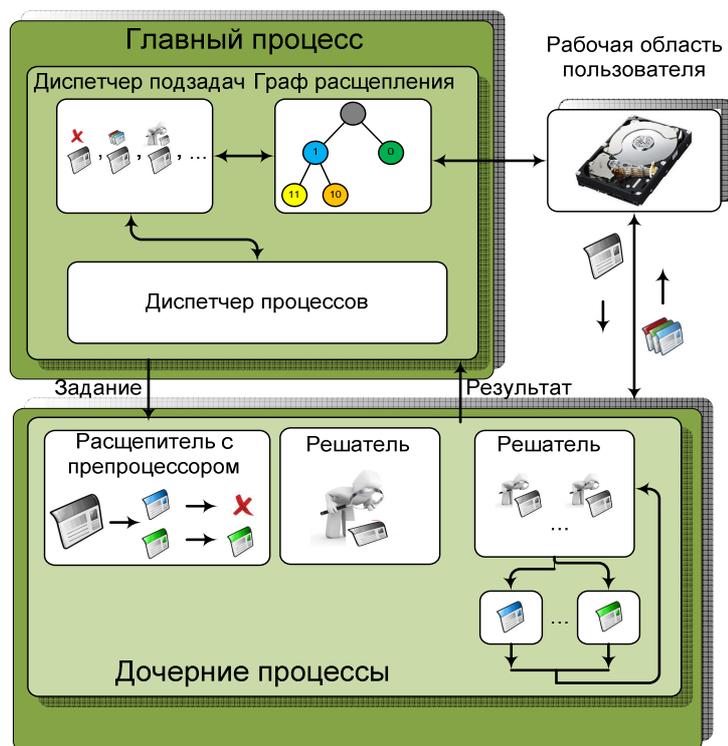


Рис. 9. Взаимодействие процессов в подсистеме PSM

Разработаны и программно реализованы новые алгоритмы поиска декомпозиционных множеств для решения SAT-задач в распределенных вычислительных средах. Разработанные алгоритмы используют принцип метода Монте–Карло для вычисления оценок параметров декомпозиционных множеств. При этом вычисляется специальным образом определяемая прогнозная функция, значения которой оценивают реакцию моделируемой вычислительной среды на вид конкретной декомпозиции. Наилучшее по прогнозу декомпозиционное множество определяется на основе глобального минимума прогнозной функции на конечном множестве. Главная особенность прогнозной функции состоит в том, что она не задана аналитически, произвольное ее значение – это время работы вычислительной среды при конкретной декомпозиции. Для оптимизации прогнозных функций предложены новые алгоритмы, использующие комбинацию локального поиска и метаэвристик. Все разработанные и реализованные алгоритмы функционируют на вычислительном кластере ИДСТУ СО РАН. Эти алгоритмы показали высокую эффективность



на тестовых задачах с известными эталонными декомпозиционными множествами.

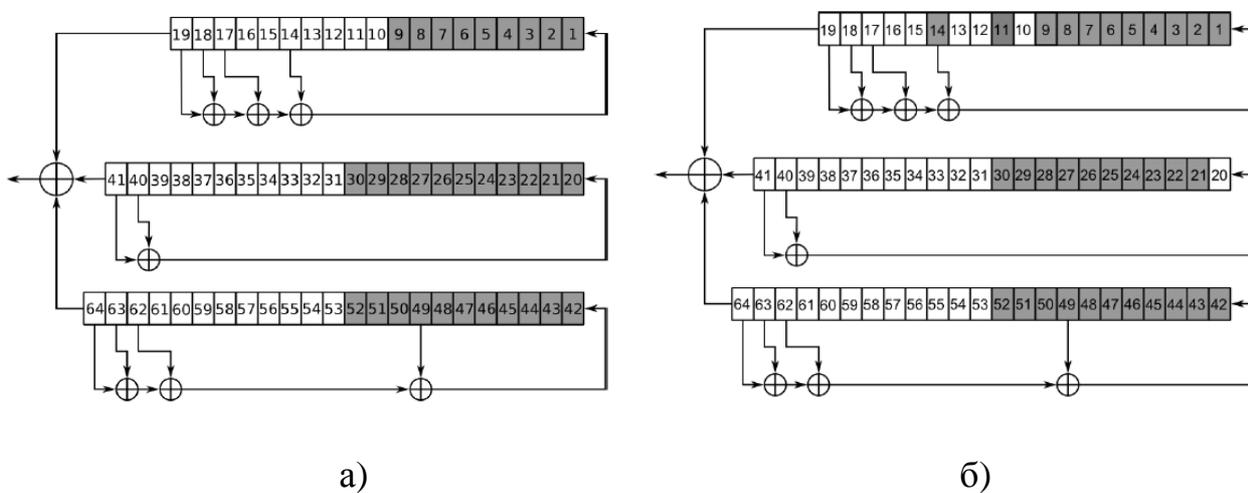


Рис. 10. Результат работы алгоритма поиска декомпозиционного множества для задачи криптоанализа генератора A5/1.

а) эталонное известное множество, б) множество, найденное автоматически



**Программа IV.31.2. Новые ГИС и веб-технологии, включая методы искусственного интеллекта, для поддержки междисциплинарных научных исследований сложных природных, техногенных и социальных систем с учетом их взаимодействия.**

**Проект IV.31.2.4. Методы и технологии разработки программного обеспечения для анализа, обработки и хранения разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении декларативных спецификаций форматов представления информации и моделей программных систем.**

*№ гос. регистрации: 01201001350*

*Научный руководитель – к.т.н. Г.М. Ружников.*

Разработаны специальные языковые конструкции для представления в декларативном виде информации о связях между БД и способах интеграции спецификаций различных БД. Разработаны настраиваемые при помощи спецификаций алгоритмы импорта данных из внешних БД, которые применяются при существенных различиях в способах представления информации в целевой и исходной базах данных. Механизм импорта предназначен для получения информации из внешних БД, в которых содержатся сведения о тех же сущностях, что и в целевой БД, но представление этой информации может существенно отличаться, например, по степени нормализации. Учитываются различия искусственных первичных ключей. Для импорта используются спецификации структур исходной и целевой БД, а также собственно спецификация импорта. Спецификация импорта должна определить связи между таблицами исходной и целевой БД. Связи задаются практически так же, как и внутри спецификаций структур БД. Основное отличие состоит в том, что при описании связей импорта может задаваться соответствие не только непосредственно между полями двух связанных таблиц, но и между полями целевой таблицы и полями, которые доступны по ссылкам из исходных таблиц (среди этих связей могут быть и связи импорта). Такая возможность требуется, чтобы учесть возможные различия в нормализации связанных таблиц. Поскольку невозможно



сопоставить искусственные первичные ключи двух БД, необходимо идентифицировать сущности по их атрибутам. Для этих целей необходимо дополнить спецификации структуры целевой БД сведениями об идентифицирующих комбинациях атрибутов. Таких комбинаций у одной таблицы может быть определено несколько, например, человека можно идентифицировать по группам атрибутов: (Фамилия, Имя, Отчество, Дата рождения), (Серия, Номер паспорта), (ИНН).

Связи в спецификации импорта определяют пути переноса информации из исходной БД в целевую. Каждая связь должна определять хотя бы одну идентифицирующую комбинацию атрибутов или задавать ссылку на ключевые поля целевой таблицы (через другую связь импорта с этой таблицей) для того, чтобы импорт был возможен. При выполнении импорта для связей импорта определяется порядок их обработки с тем, чтобы к моменту выполнения импорта по некоторой связи все используемые при этом связи были уже обработаны. В результате обработки каждой связи формируются вспомогательные таблицы, в которых запоминаются соответствия между первичными ключами записей исходной и целевой таблиц. Эти таблицы используются при выполнении импорта по связям, использующим данную. В первую очередь находится соответствие между записями двух таблиц с совпадающими значениями идентифицирующих комбинаций, которые задает связь. В том случае, если связь задает значения каких-либо еще полей, помимо идентифицирующей комбинации, эти значения также обновляются в найденных существующих записях. Далее в целевую таблицу добавляются записи, соответствие для которых среди существующих найдено не было. Вспомогательные таблицы могут также использоваться администратором импорта для того, чтобы проанализировать результаты. Повторный импорт не изменившейся информации внешней БД по спецификации импорта не будет приводить к изменениям в целевой БД, поэтому механизм импорта может быть использован для регулярного обновления целевой БД.

В системе BinExpl реализован модуль генерации кода чтения данных на императивных языках программирования по спецификации формата бинарного фай-



ла, подготовленной на языке FlexT. В результате работы модуля создается класс чтения, потомок TBaseDataReader, обеспечивающий доступ к содержащейся в файле информации. Для простых типов данных, непосредственно представимых в целевом языке программирования (например, записей с полями простых типов), создаются соответствующие определения типов. Для более сложных типов данных создаются классы доступа, предоставляющие возможность получения информации о составляющих и свойствах типа через поля, методы и свойства (если свойства поддерживаются в целевом языке) класса. Для получения доступа к объявленным в спецификации глобальным переменным создаются поля и методы этого класса, возвращающие классы доступа для сложных данных, и указатели на соответствующие структуры целевого языка программирования для простых. Для поддержки генерации кода на различных языках программирования код генератора разбит на не зависящий от целевого языка (front-end), при помощи которого создается внутреннее представление информации о структурах данных и подпрограммах генерируемого кода, и предназначенные для конкретного целевого языка модули (back-end). Для не зависящего от особенностей конкретного языка программирования представления информации о генерируемой программе разработана библиотека классов, представляющих типы данных, выражения, операторы и т.д. Back-end является классом – потомком абстрактного базового класса TDTLangExport и реализует такие методы, как: вывести определение массива, вывести условный оператор, вывести определение класса, вывести реализацию класса и т.д. Методы back-end класса получают в своих аргументах экземпляры классов, содержащие отображаемую информацию. Для генерации кода на языке C++ разработан соответствующий потомок класса TDTLangExport, обеспечивающий генерацию исходных текстов в соответствии с особенностями данного языка.

Разработанный в ИДСТУ СО РАН формат MGR (Multi Resolution Grid), предназначенный для представления без потери информации растровых данных большого объема, адаптирован для хранения многоканальных изображений. Для каждого блока изображения данные нескольких каналов последовательно разме-



щаются в памяти, что позволяет использовать для их обработки алгоритмы, разработанные для одноканальных изображений. Кроме того, разделение данных каналов в памяти повышает эффективность использования алгоритмов сжатия, что особенно важно для применяемого в формате MRG алгоритма BCRL. Для анализа эффективности применения алгоритмов декорреляции цветочных каналов были реализованы режимы сохранения изображения без декорреляции и сохранения изображения с применением ранее известного преобразования простой обратимой декорреляции компонент RGB изображения. Простая обратимая декорреляция компонент RGB изображения задается формулами

$$Y_r = \lfloor (R+2G+B) / 4 \rfloor; U_r = R-G; V_r = B-G.$$

При этом обратное преобразование определяется следующим образом:

$$G = Y_r - \lfloor (U_r+V_r) / 4 \rfloor; R = U_r+G; B = V_r+G.$$

Таким образом, простая обратимая декорреляция является достаточно грубым приближением преобразования цветового пространства RGB в YCrCb, определяемого стандартом CCIR 601:

$$\begin{array}{|c|} \hline Y \\ \hline Cr \\ \hline Cb \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|ccc|} \hline 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ \hline 0.500 & -0.419 & -0.081 \\ \hline -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline R \\ \hline G \\ \hline B \\ \hline \end{array}$$

Несмотря на простоту данного преобразования, его использование показало высокую эффективность. Так, исходный космоснимок в формате .tif без сжатия с тремя 16-битными каналами (R,G,B), размером 15544x11332 пикселей занимает 1008 Мб. В формате MRG без декорреляции каналов эти данные занимают 310 Мб. После применения простой обратимой декорреляции компонент RGB изображения объем файла сокращается до 240 Мб. Для сравнения отметим, что при максимальной степени сжатия в архиве ZIP этот файл занимает 440 Мб и 331 Мб в архиве RAR. Во всех тестах при генерации MRG-файлов не использовался выбор алгоритма сжатия заголовков интервалов в соответствии со статистическими свойствами изображения, позволяющий далее повысить степень сжатия.



При использовании для декорреляции изображения преобразования, учитывающего его статистические свойства, можно рассчитывать на получение более высокого коэффициента сжатия. Реализован алгоритм выделения главных компонент цветового пространства изображения для разностей между результатами интерполяции по данным менее детальных блоков и истинными цветовыми значениями. Для рассматриваемого космоснимка он дает следующую матрицу преобразования:

$$\begin{vmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0.606 & 0.598 & 0.525 \\ 0.450 & -0.802 & 0.393 \\ -0.656 & -0.002 & 0.755 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix}$$

В качестве обратимой аппроксимации этого преобразования был предложен следующий оригинальный алгоритм декорреляции RGB-растра:

$$Cr_1 = \lfloor (R+G+B) / 3 \rfloor ; Cr_2 = \lfloor (R+B-2G) / 2 \rfloor ; Cr_3 = B-R.$$

При этом обратное преобразование определяется следующим образом:

$$C = Cr_2 + (Cr_3 \bmod 2); G = Cr_1 - \lfloor C/3 \rfloor ; R = G + (C + Cr_3)/2 ; B = G + (C - Cr_3)/2.$$

Для предложенного алгоритма доказана его обратимость. С использованием этого преобразования тот же тестовый файл был сжат до 235 Мб. Для дальнейшего повышения степени сжатия за счет декорреляции компонент многоканальных изображений необходимо провести дополнительные исследования по автоматизации создания алгоритмов обратимой декорреляции цветовых каналов по полученным матрицам перехода к главным компонентам.

Разработаны инструментальные средства, позволяющие интерактивно управлять (создавать, изменять) спецификациями приложений, основанных на использовании спецификаций структур БД, что в результате ускоряет процесс разработки в целом. Разработанный визуальный пользовательский интерфейс позволит снизить требования к знанию Языка представлений баз данных и тем расширить круг специалистов использующих технологию спецификации структур баз данных для создания приложений.

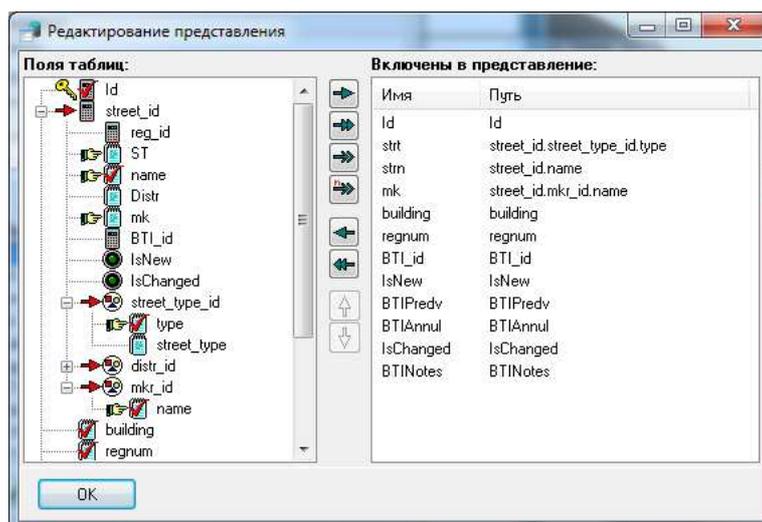


Рис. 11. Форма редактирования свойств представления

Разработаны инструментальные средства, позволяющие интерактивно управлять (создавать, модернизировать) спецификациями приложений БД. Созданный прототип системы управления спецификациями приложений БД обеспечивает при помощи визуальных средств разработки настройку структуры приложения: выбор необходимых таблиц БД, указание связей между таблицами, настройка видов полей, создание представлений, настройку способов отображения информации из таблиц и представлений пользователям, подключение спецификаций внешних БД, настройку механизмов интеграции с ГИС. Например, в зависимости от информации, хранящейся в полях таблиц, им могут быть определены виды, заданы контроль вводимых данных, настроен режим ограничения на редактирование. Если в одном или нескольких полях таблицы содержатся уникальные значения (т.е. они формируют естественный ключ), то эти поля могут быть определены как именованные, в результате чего при работе с ними автоматически будут задействованы механизмы сортировки и автофильтрации. Необходимо отметить, что инструментальное средство автоматически анализирует содержимое таблиц и предлагает определять такие поля как именованные. Для записей из таблиц и представлений порядок размещения и группировки полей редактирования может быть скорректирован при помощи явного включения в спецификацию информации о структуре формы. При редактировании информации в памяти создаются копии измененных



объектов, при этом в случае удаления, например, описаний полей или связей между таблицами эти объекты помечаются флагом удаления, в результате чего сохраняется возможность использования номеров объектов в качестве ссылок на них. Для контроля изменений спецификаций в инструментальное средство встроены механизмы анализа, отслеживающие и предупреждающие пользователя о критических изменениях, которые могут привести к некорректной работе приложения БД. Контроль выполняется автоматически при сохранении спецификации. Разработанная визуальная инструментальная система позволяет снизить требования к разработчикам приложений БД в плане знания языков программирования, дает возможность создавать и модернизировать спецификации приложений баз данных предметным специалистам, не являющимися программистами, а также ускорить процесс разработки в целом.

Дополнительно в инструменте Web-публикации DBLib реализованы средства редактирования информации, используемой при публикации содержимого БД. Так, поддерживается создание страниц отображения информации и автоматическая генерация шаблонов страниц.

Проведены работы по формированию и ведению БД поддержки междисциплинарных научных исследований Байкальской природной территории на основе БД институтов Иркутского научного центра (ИНЦ) СО РАН. Наряду с сервисами геообработки БД существует необходимость в хранении и обмене текстовыми документами (заявки, отчеты, аналитические материалы и т.д.).

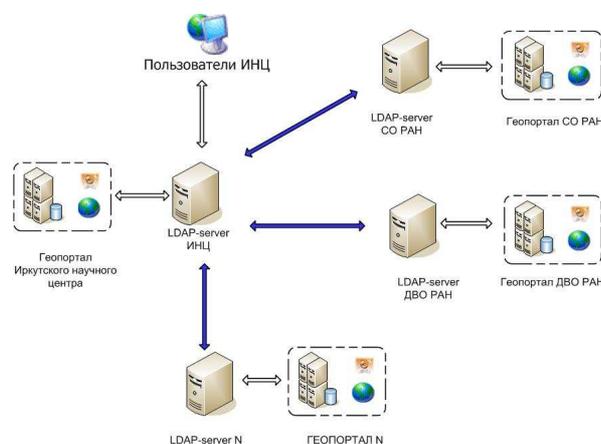


Рис. 12. Архитектура



В Сибирском отделении РАН для обеспечения взаимодействия серверов разрабатывается корпоративный каталог. В его задачи входит:

- каталогизация информационных ресурсов и сетевых сервисов;
- обеспечение единой инфраструктуры аутентификации и авторизации пользователей информационных систем СО РАН;
- обеспечение глобальных политик доступа к информационным ресурсам;
- мониторинг доступности информационных ресурсов и сетевых сервисов;
- создание автоматически актуализируемой распределенной справочной;
- обеспечение работы совместных и частных распределенных информационных систем.

Корпоративный каталог разрабатывается как централизованно-распределенная информационная система с разграничением зон ответственности между центрами и организациями. Корпоративный каталог создается на основе семейства LDAP-серверов (Lightweight Directory Access Protocol). Разработаны компоненты инфраструктуры взаимодействия на уровне серверов обмена данными и метаданными. Проведена работа по взаимодействию между серверами на основе LDAP — «облегченный протокол доступа к каталогам» — протокол прикладного уровня для доступа к службе каталогов. LDAP — это относительно простой протокол, использующий TCP/IP и позволяющий производить операции авторизации (bind), поиска (search) и сравнения (compare), а также операции добавления, изменения или удаления записей. Обычно LDAP-сервер принимает входящие соединения на порт 389 по протоколам TCP или UDP. Для LDAP-сеансов, инкапсулированных в SSL (Secure Sockets Layer — уровень защищенных сокетов) — криптографический протокол, который обеспечивает установление безопасного соединения между клиентом и сервером. На основании протокола SSL 3.0 был разработан и принят стандарт RFC, получивший имя TLS. Протокол обеспечивает конфиденциальность обмена данными между клиентом и сервером, использующим TCP/IP. Каталоги такого рода, как правило, содержат статические и редко



изменяемые элементы, так как каталоги изначально оптимизированы для очень быстрого отклика на запросы поиска и чтения данных.

Такие каталоги полностью структурированы. Каждый элемент данных имеет имя, которое одновременно определяет положение элемента в иерархии каталога. Каждый атрибут элемента, как правило, может иметь несколько значений и это является нормальным поведением в отличие от обычных баз данных.

Каталоги являются очень специфическими системами хранения данных. Их удобно использовать для иерархически скомпонованных объектов. Каталоги могут быть реплицированы между несколькими серверами для организации удобного доступа и распределения нагрузки. Текстовая информация хорошо подходит для каталогов, так как легко поддается поиску, но данные могут быть представлены и в любой другой форме.

Основная цель разрабатываемого сервиса направлена на взаимодействие между каталогами ИНЦ СО РАН и СО РАН.

Предложен подход к анализу и обработке слабоструктурированной табличной информации на основе экспертной системы. Разработан прототип системы анализа логической компоновки таблицы, представленной в слабоструктурированном виде, на основе экспертных знаний. В настоящем прототипе используются тестовые входные данные — специально подготовленные таблицы в формате табличного процессора Excel. Они содержат полную и точную информацию о расположении таблицы внутри листа табличного процессора, ее декомпозиции на отдельные ячейки и графическом форматировании. В то же время они не содержат абсолютно никакой информации о ролях (функциях) ячеек (содержат ли они заголовки или данные), типах данных ячеек (каким измерениям в терминах реляционной модели данных они принадлежат) и связях между ячейками. Процесс анализа и обработки, выполняемый в данном прототипе, состоит в восстановлении перечисленной недостающей информации. Прототип включает экспертную систему, построенную на основе свободной системы управления бизнес-правилами Drools (JBoss Community) и системы исполнения правил Drools Expert. В прототипе ис-



пользуется база знаний с продукционными правилами, записанными на диалекте MVEL. Представленные в прототипе правила позволяют отображать существующие факты о декомпозиции и графическом форматировании таблицы в восстанавливаемые факты о ролях, типах данных и связях табличных ячеек. Для представления исходной и целевой табличной информации предложены модели физической и логической компоновки таблицы. Эти модели реализованы в виде структур данных, которые служат также для представления фактов в процессе машинного вывода. Кроме того, разработаны вспомогательные структуры данных и алгоритмы, которые позволяют сопоставлять естественно-языковое содержание таблицы со словарями регулярных выражений и определять типы данных содержимого табличных ячеек. Выходные данные представлены в формате табличного процессора Excel, но при этом являются структурированными и соответствуют реляционной модели данных. В настоящий момент прототип находится на этапе тестирования и накопления экспертных знаний.

```
rule "Recovering relations and label roles in the head"
  dialect "mvel"
  salience -2
  no-loop true
  when
    $c1 : CCell( cl > 1 )
    $c2 : CCell( cl > 1, rt == $c1.rb + 1,
      ( $c1.cl <= cl && cr < $c1.cr ) || ( $c1.cl < cl && cr <= $c1.cr ) )
  then
    modify ( $c1 ) { setRole( Role.COLLABEL ) };
    modify ( $c2 ) { setRole( Role.COLLABEL ) };
    $c1.addConnectedCell( $c2 );
  end
```

Рис. Пример правила анализа и обработки слабоструктурированной табличной информации на диалекте MVEL

Разработан логико-синтаксический метод распознавания объектов, предназначенный для поиска объектов на растровых и векторных изображениях в условиях неполноты и размытости информации. Метод использует деформируемые модели объектов, которые задаются набором логических правил. Правила определяют положение и размеры различных графических примитивов. Процедура распознавания объектов строится как логический вывод цели. Механизм логического вывода реализует поиск в глубину, в ходе которого производится унификация



(поиск) границ объектов, удовлетворяющих структурным ограничениям. Для получения положения графических примитивов используются специальные предикаты, которые выбирают положение, согласованное с остальными частями объекта. Каждый участок границы сегмента получает некоторую оценку функции принадлежности. В общем случае процедура строится как минимизация «функции энергии», скомпонованная из набора функций принадлежности для участков границ объекта. Реализован метод в виде сервиса в соответствии со стандартом WPS. Архитектура реализации метода представлена на рис. 14.

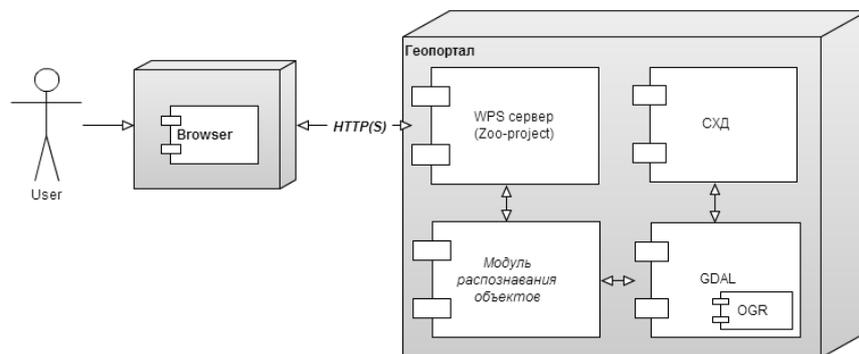


Рис. 14. Реализация сервиса распознавания объектов

На входе сервиса требуются следующие параметры:

- описание деформируемой модели объекта;
- растровое изображение (возможно с пространственной привязкой);
- экстенд области обработки изображения.

На выходе распознанные объекты сохраняются в формате SHP.

Создано ядро системы автоматического доказательства теорем для метода поиска доказательства позитивно-образованных формул, основанное на современных алгоритмах повышения производительности и управления оперативной памятью. Ядро представляет собой функциональный блок новой версии системы автоматического доказательства теорем (АДТ) в исчислениях позитивно-образованных формул (С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, В.М. Матросов), которая на классе задач, представленных в виде формул исчисления первого порядка, не уступает по про-



изводительности современным системам АДТ, таким как Vampire, EP, iProver, Ayane, SPASS, SRASS, Darwin, LeanCoP. Для этого решены следующие основные задачи.

В ядро вошли новые методики повышения эффективности поиска ЛВ в исчислении позитивно-образованных формул (ПО-формул) на основе эффективных структур представления ПО-формул, обеспечивающих разделение оперативной памяти компьютера между сходными вариантами данных, новых стратегий поиска логического вывода, например,  $k, m$ -ограничения. Одна из версий ядра системы поддерживает параллельные схемы алгоритмов поиска доказательства на параллельных кластерных архитектурах в асинхронном режиме.

Произведена адаптация существующих стратегий и алгоритмов повышения эффективности поиска ЛВ для исчисления ПО-формул, найденных в литературе и успешно используемых в вышеперечисленных системах АДТ, в том числе, индексирование термов, некоторые варианты разделения памяти, управление логическим выводом на основе модификаторов стратегии по умолчанию.

Проведено тестирование системы на задачах из стандартной библиотеки TRTP. В результате разработанная версия системы значительно расширяет класс успешно решаемых задач методом поиска вывода позитивно-образованных формул по сравнению с предыдущими системами АДТ, базирующимися на исчислении ПО-формул. Разработана инфраструктура взаимодействия с библиотекой задач TRTP. Выделены классы задач, которые система решает эффективнее, чем другие системы АДТ.

Применение системы для решения ряда задач показало, что система соответствует мировому уровню в данной области. Указаны классы задач как с точки зрения формы их представления, так с точки зрения предметных областей, на которых разработанная система выигрывает у основных мировых лидеров. Исходный код системы и разработанные программные модули сформировали инструментальные средства для создания специализированных версий программных систем АДТ, ориентированных на задачи с определенными свойствами.



Разработан оригинальный формат данных для представления порожденного процедурами трансформации в рамках методике MDA программного кода, включающего дополнительную семантическую разметку, позволяющую ассоциировать сгенерированные конструкции с элементами исходной модели. Созданы алгоритмы сравнения версий исходного кода, позволяющего сохранять изменения разработчика между сгенерированными версиями программного кода в информационно-структурной модели

В основе формата использованы форматы представления исходного кода в виде правильной программы (Literate Program). Правильная программа состоит из трех частей: текста, излагающего суть функции на естественном языке, реализующей представленным фрагментом исходного кода, фрагментов исходного кода и семантической разметки исходного кода, инкорпорированной в текст на естественном языке. Современные open-source системы литературного программирования, такие как WEB (Д. Кнута), NoWEB, LEO, ORG-mode редактора EMACS позволяют реализовать как процедуру порождения программного модуля, так и распознавание изменений в рамках одного семантического тега разметки.

Теги семантической разметки правильной программы формата NoWEB/LEO представляют собой структурные сущности высокоуровневой модели фрагментов кода. В частности, в оригинале семантика фрагмента кода – это элемент онтологии (концепт), если он размечает фрагмент, где задаются данные, или отношение, где реализуется функция. В связи с этим этот формат дополнен элементами уточнения семантики, позволяющими полностью отображать семантику элементов модели UML, исходной модели, используемой нами как конфигурации для процедур порождающего программирования. Разработаны алгоритмы сравнения деревьев синтаксического разбора, размеченных тегами правильной программы, где разметка используется в качестве эвристических данных. Данный алгоритм обобщает известный алгоритм diff сравнения исходного кода текстовых программ на программы, представляющие собой вполне упорядоченные структуры (множества строк), которые и создаются процедурами порождающего программирования.



**Приоритетное направление IV.32. Архитектура, системные решения, программное обеспечение и информационная безопасность информационно-вычислительных комплексов и сетей новых поколений. Системное программирование.**

**Программа IV.32.1. Архитектура, системные решения, программное обеспечение и информационная безопасность информационно-вычислительных систем новых поколений.**

**Проект IV.32.1.2. Информационно-вычислительные системы нового поколения для формаций автономных необитаемых аппаратов.**

*№ гос. регистрации: 01201001346*

*Научный руководитель – ак. И.В. Бычков.*

Исследованы известные подходы к обработке предиката равенства в различных системах автоматического доказательства теорем (АДТ). Основная масса исследований в этой области связана с применением теории систем переписывания термов. Известное правило парамодуляции, используемое в основанном на правиле резолюции методе АДТ, развито до самостоятельного исчисления суперпозиций. Произведен анализ возможности адаптации подхода, основанного на правиле парамодуляции, для обработки равенства в методе опровержения позитивно-образованных формул (ПО-формул). Данный подход, в отличие от других, обладает большей общностью, что необходимо при построении вывода в исчислении ПО-формул с функциональными символами. В отличие от прямого использования аксиом равенства использование дополнительного правила вывода (парамодуляции) позволяет существенно сократить сложность поиска вывода формул с равенствами.

Предложенный ранее эволюционный подход к задачам динамического планирования групповых маршрутов автономных необитаемых аппаратов (АНА) был адаптирован для задачи выполнения групповой миссии по мониторингу заданной акватории. Под мониторингом акватории подразумевается периодическое посе-



щение аппаратами группы некоторого множества контрольных точек (с целью взятия проб, проведения замеров, получения фотоизображений) в соответствии с заданными для каждой цели временными периодами. Задача планирования такой миссии состоит в поиске группового маршрута, обеспечивающего, насколько это возможно, своевременное посещение всех контрольных точек (целей). Основными ее отличиями от постановки, рассмотренной на первых этапах проекта, являются требования ко времени посещения каждой цели и необходимость неоднократного посещения всех контрольных точек, связанная с неограниченным по времени характером миссии. Предложена графовая постановка задачи мониторинга, введены понятия текущей актуальности цели и функции роста актуальности, позволяющие оценивать «пунктуальность» отдельного маршрута, выделены основные принципы экспертного построения функции оценки эффективности генетических алгоритмов (ГА).

Рассмотренные задачи и предложенный подход для их решения были программно реализованы в разрабатываемой в рамках проекта среде «AUV Mission Planner», позволяющей планировать динамические миссии группы АНА и моделировать процесс их выполнения. По результатам набора тестовых задач найдены вероятностные коэффициенты выбора операторов ГА, обеспечивающие наиболее быструю сходимость алгоритма.

Для задачи сканирования акватории (гарантированного покрытия) был разработан эвристический подход, позволяющий строить опорные траектории для аппарата, производящего посредством гидролокатора бокового обзора съемку аппарата (лидера группы аппаратов). Движение АНА по траектории гарантирует покрытие всей заданной области с учетом ширины полосы съемки. Разработанный подход позволяет строить остовное дерево, оптимальное по критерию суммарного угла поворотов в предположении заданного предпочтительного направления движения.

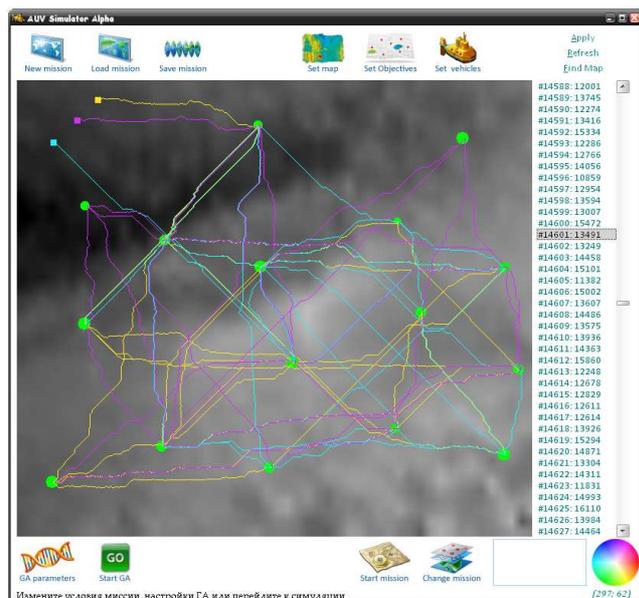


Рис. 15. Групповой маршрут АНПА в окне программы «AUV Mission Planner»

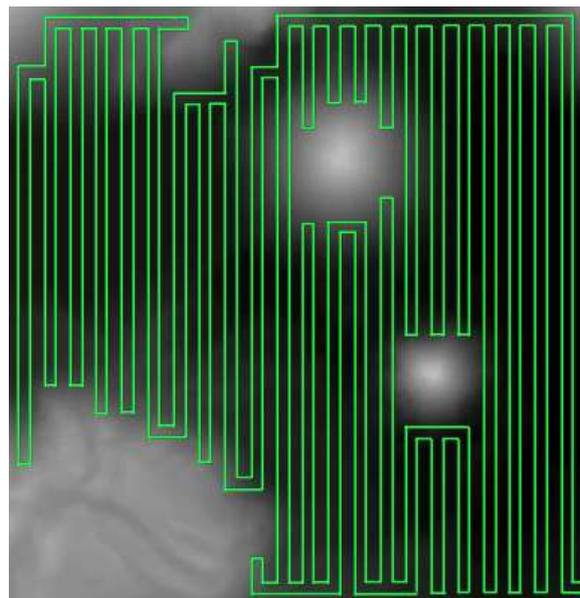


Рис. 16. Опорная траектория на заданном трехмерном рельефе

Исследовалась задача гарантированного обнаружения подвижных объектов группой АНА в процессе патрулирования при охране трехмерной области. В качестве охраняемой области рассмотрена часть придонного пространства, ограниченная полусферой. Сформулированы условия, которым должны удовлетворять законы движения патрульных для гарантированного обнаружения всех проникновений в охраняемую область. Рассмотрен ряд законов, удовлетворяющих заданным условиям.

В системе Matlab разработан специализированный инструментарий (Toolbox) для исследования динамики и синтеза управлений формациями АНА, который представляет собой набор функций, реализующих следующие возможности:

- создание структур данных, которые описывают модель желаемого поведения формации, включающую уравнения движения группы, значения переменных состояния АНА в невозмущенном движении, уровни допустимых внешних возмущений и неопределенностей, а также погрешности и др. характеристики элементов системы управления АНА;
- преобразование этих структур в модели (структуры) программного пакета «ВФЛ-РЕДУКТОР» с целью дальнейшего исследования динамики формаций и синтеза стабилизирующих управлений;



- расчет программных управлений, реализующих простые типы движений: прямолинейное движение и разворот на заданный угол;
- задание миссии группы в виде последовательности типовых движений и ее отработка;
- симуляция движения группы и визуализация динамики.

С помощью пакета программ “ВФЛ-РЕДУКТОР” и разработанного Toolbox’а для исследования динамики формаций для модельных группировок АНА с конфигурациями типа цепочка, стая и шеренга выполнены численные расчеты по оценке устойчивости и синтезу стабилизирующего управления. Расчеты выполнены с учетом ограниченности управлений, неопределенности и нелинейности характеристик измерителей и исполнительных органов, а также неопределенности параметров объектов. Примеры траекторий движения группы в формации типа шеренга представлены ниже на рисунках.

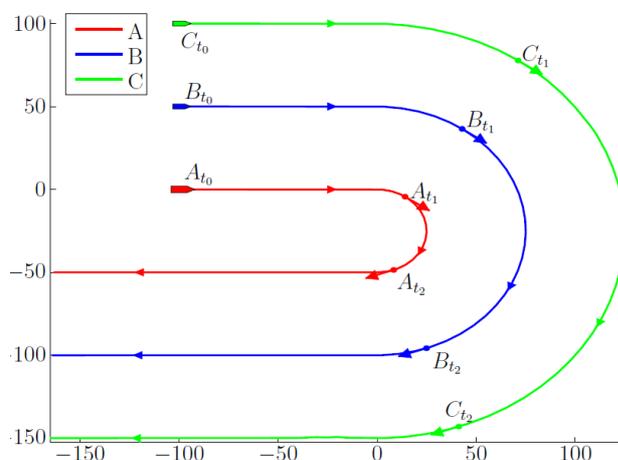


Рис. 17. Траектории движения группы АНПА при развороте

Рассмотрены постановки и математические формализации некоторых типовых задач устойчивости формаций движущихся АНА с изменениями состава и реконфигурацией (вследствие отказов и (или) вхождения новых агентов).

Рассмотрены модели дискретно-событийной системы (ДСС) с частично наблюдаемыми событиями, а также наблюдением за состояниями. С помощью метода логико-алгебраического управления было показано, что исследование систем с



наблюдаемыми состояниями может быть сведено к исследованию систем, в которых наблюдаются только события. Для таких задач уже разработан достаточно эффективный инструментарий, в том числе построения супервизоров, обеспечивающих максимально возможный управляемый язык (удовлетворение спецификации). Полученные результаты могут быть применены в исследовании задач диагностики ДСС. Для случая формализации явления частичной наблюдаемости с помощью «масок событий» вместо проекций на множество наблюдаемых событий (Cieslak и др.) было показано, что управление может строиться на основе включения результатов выхода наблюдателя в множество событий.

В задаче децентрализованного распределения формаций АНА при исследовании территории, разделенной на несколько областей, получена оценка скорости сходимости алгоритма перераспределения к множеству, приближенно описывающему пропорциональное распределение аппаратов по областям в соответствии с приоритетами и определяющему достаточно малое отклонение от желаемого распределения. Полученная оценка зависит от общего числа АНА в областях, приоритетов последних, а также максимального числа шагов перераспределения между моментами выходов АНА на связь со своими координаторами.