

Теория комплексного моделирования сложных объектов, квалиметрии моделей и полимодельных комплексов

И. И. Астахова

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет), Financial University
astaha@mail.ru

Аннотация. К настоящему времени наука создала богатый методологический и методический аппарат, позволяющий успешно преодолевать трудности, связанные с воздействием факторов сложности в современном мире. В основу этого аппарата положена системная отрасль научных знаний, одной из компонент которой является квалиметрия моделей и полимодельных комплексов, представляющая из себя прикладную науку, ориентированную на разработку методологии и технологий оценивания качества указанных моделей и комплексов.

Ключевые слова: полимодели; моделирование; квалиметрия; объекты; комплекс

Говоря о проблемах сложности современных объектов, принято выделять следующие основные аспекты сложности: структурную сложность, сложность функционирования, сложность принятия решений и выбора сценариев поведения, сложность развития, сложность их формального описания и моделирования. Следует отметить, что в области оценивания качества моделей к настоящему времени получено много интересных научных и практических результатов, связанных как с количественным и качественным оцениванием и анализом таких свойств моделей как адекватность, сложность, неопределенность, так и с упорядочением и выбором (синтезом) моделей для решения заданных классов задач. При этом для различных предметных областей создавались свои теории и технологии моделирования, разрабатывались и разрабатываются огромное количество банков моделей и полимодельных комплексов, которые широко используются на практике. Вместе с тем, при наличии большого разнообразия моделей остаются открытыми вопросы обоснованного выбора моделей, сравнения различных технологий моделирования. При решении перечисленных задач важную роль играют, во-первых, задачи выбора универсальных формальных средств, позволяющих на едином метаязыке описывать различные классы и виды моделей и полимодельных комплексов, и, во-вторых, задачи обоснования и выбора системы показателей качества и соответствующих методик многокритериального оценивания, анализа и упорядочения исследуемых моделей и полимодельных комплексов.

Квалиметрия (измерение качества) моделей имеет конечной целью выбор или создание наиболее

эффективной модели решения задачи. Уникальная модель оценивается на соответствие требованиям решаемой задачи. При возможности применения разных моделей выявляется наилучшая модель. Для оценивания качества модели используются такие факторы как соответствие поставленной задаче, трудоёмкость и достоверность моделирования. Они, в свою очередь, детализируются на измеряемые показатели. При наличии нескольких моделей-претендентов на решение конкретной задачи для выбора наилучшей используются методы многокритериальной оптимизации, учитывающие все показатели качества модели. При решении класса задач для каждой из них следует найти наиболее приемлемую по качеству модель. Эта проблема может быть решена подбором модели для каждой задачи из класса. В работе для подбора моделей предлагается использовать логический анализ их свойств в сопоставлении с требованиями решаемых задач. Подход иллюстрируется на примере выбора методов многокритериальной оптимизации для различных задач принятия решений. Логический анализ может быть реализован в рамках экспертной системы по выбору наиболее эффективного метода решения конкретной задачи. Модели, имеющие ограничения по размерности в силу экспоненциального роста трудоёмкости вычислений, имеют ограниченную сферу применения. Сфера применения модели полиномиальной сложности может перекрывать сферу применения модели экспоненциальной сложности, однако уступать в качестве моделирования. Поэтому при достаточно большом числе моделей-претендентов на решение задачи может использоваться логический анализ в поиске наиболее приемлемой модели.

1. ПОНЯТИЕ И СУЩНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

При определении сложности полимодельного комплекса, в который входят модели, представленные на языке одного сорта, следует учитывать их взаимодействие. В рамках языков одного сорта (уровня) оценивается сложность операции подстановки. При оценивании полимодельного комплекса, включающего по терминологии многосортной алгебраической системы модели разного сорта, необходимо учитывать помимо сложности самих моделей сложность перевода с языка одного сорта на другой. Для оценивания его сложности

будем использовать модель с иерархической структурой сортов моделей. При переходе от более простого языка к более сложному языку применяется операция группировки, а при обратном переходе – операция свёртки. Поясним это на следующих примерах. При переходе от скалярных оценок к векторной оценке используется операция группировки (конкатенации). При обратном переходе вектор свёртывается в скаляр с помощью синтезирующей функции. При переходе от векторных оценок к матричной оценке выполняется объединение векторов в матрицу. При умножении матрицы на вектор получаем вектор. Таким образом, при оценивании двухсортной модели к оценкам сложности модели каждого сорта должны добавляться функции перевода с языка одного сорта модели на другой, как прямые, так и обратные при двустороннем взаимодействии. Этой идее отвечает формула: Сложность двухсортной модели = сложность модели сорта 1 + сложность модели сорта 2 + сложность перевода (1, 2) + сложность перевода (2, 1). Аналогичным образом, оценивается сложность модели с большим числом сортов, как полимодельного комплекса. При этом очень важно проверять каждый раз корректность перехода от модели к модели.

При определении сложности полимодельного комплекса, в который входят модели, представленные на языке одного сорта, следует учитывать их взаимодействие. В рамках языков одного сорта (уровня) оценивается сложность операции подстановки. При оценивании полимодельного комплекса, включающего по терминологии многосортной алгебраической системы модели разного сорта, необходимо учитывать помимо сложности самих моделей сложность перевода с языка одного сорта на другой. Для оценивания его сложности будем использовать модель с иерархической структурой сортов моделей. При переходе от более простого языка к более сложному языку применяется операция группировки, а при обратном переходе – операция свёртки. Поясним это на следующих примерах. При переходе от скалярных оценок к векторной оценке используется операция группировки (конкатенации). При обратном переходе вектор свёртывается в скаляр с помощью синтезирующей функции. При переходе от векторных оценок к матричной оценке выполняется объединение векторов в матрицу. При умножении матрицы на вектор получаем вектор. Таким образом, при оценивании двухсортной модели к оценкам сложности модели каждого сорта должны добавляться функции перевода с языка одного сорта модели на другой, как прямые, так и обратные при двустороннем взаимодействии.

II. КАЧЕСТВО МОДЕЛЕЙ И ПОЛИМОДЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Качество модели формируется на начальных этапах её жизненного цикла, а реализуется при её конкретном использовании. Жизненный цикл модели любого объекта состоит из следующих этапов:

1. Разработка.
2. Модификация.
3. Настройка на задачу.

4. Решение задачи.

5. Анализ результатов и переход на 3 или 2 или 1.

Разработка модели делится на следующие этапы: проектирование формальной модели объекта, разработку на её основе компьютерной модели, проверку компьютерной модели. На первом этапе изучаются свойства моделируемого объекта, и выбирается отражающий их математический аппарат. Основной целью этапа создания математической модели является обеспечение полноты моделируемых свойств объекта и точности их отражения в модели. По этим требованиям и определяется соответствие (адекватность) модели объекту. Для представления свойства моделируемого объекта может применяться различный математический аппарат. Например, для распознавания символов алфавита могут применяться методы теории графов (скелетные графы эталонных символов), теории фильтрации (волновые алгоритмы) и нейронные сети. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, влияющие на показатели качества модели. Компьютерная модель объекта создаётся двумя способами: параметризацией типовой модели, либо программированием оригинальной модели. На этом этапе решаются проблемы размерности модели и сложности вычислений. Размерность модели оценивается объёмом требуемой памяти, а сложность вычислений – временем решения задачи. Если параметризация типовой модели не позволяет добиться нужных результатов, выбирается другая типовая модель. Например, выбирается другая архитектура нейросетевой модели. Проверка спроектированной модели осуществляется с применением методов верификации и тестирования. Устранение обнаруженных ошибок осуществляется в процессе отладки модели. На этом этапе качество модели характеризуется числом пропущенных ошибок проектирования.

При определении сложности полимодельного комплекса, в который входят модели, представленные на языке одного сорта, следует учитывать их взаимодействие. В рамках языков одного сорта (уровня) оценивается сложность операции подстановки. При оценивании полимодельного комплекса, включающего по терминологии многосортной алгебраической системы модели разного сорта, необходимо учитывать помимо сложности самих моделей сложность перевода с языка одного сорта на другой. Для оценивания его сложности будем использовать модель с иерархической структурой сортов моделей. При переходе от более простого языка к более сложному языку применяется операция группировки, а при обратном переходе – операция свёртки. Поясним это на следующих примерах. При переходе от скалярных оценок к векторной оценке используется операция группировки (конкатенации). При обратном переходе вектор свёртывается в скаляр с помощью синтезирующей функции. При переходе от векторных оценок к матричной оценке выполняется объединение векторов в матрицу. При умножении матрицы на вектор получаем вектор. Таким образом, при оценивании двухсортной модели к оценкам сложности модели каждого сорта должны добавляться функции перевода с языка

одного сорта модели на другой, как прямые, так и обратные при двустороннем взаимодействии.

Модификация модели может потребоваться при изменении условий задачи, существенно не влияющих на применяемый математический аппарат. Базовые соотношения остаются неизменными. Меняется состав переменных. Например, изменился состав распознаваемых символов. Эти изменения влекут изменение контрольных, обучающих и тестовых примеров. Изменение состава переменных влияет на размерность модели. Если нужный результат не получается модификацией компьютерной модели, меняется формальная модель вплоть до привлечения другого математического аппарата.

Настройка на задачу представляет собой преобразование модели-прототипа в модель-экземпляр. Переменные модели заменяются константами, характеризующими конкретную задачу. В практическом плане настройка на задачу сводится к сбору и вводу в модель-прототип исходных данных. Этот этап оценивается трудоёмкостью подготовки модели к решению задачи. Все подготовительные этапы характеризуются трудоёмкостью в человеко-часах и временем выполнения этапа. Этап решения задачи оценивается привлекаемыми вычислительными ресурсами и временем решения задачи. Результаты решения задачи анализируются на предмет достоверности. Достоверность вычисляемых величин определяется их точностью. Таким образом, полная оценка качества модели должна отражать все этапы её жизненного цикла. Рассмотрим подробнее показатели качества моделей.

III. КВАЛИМЕТРИЯ МОДЕЛЕЙ

Степень соответствия свойств модели и объекта-оригинала является одним из важнейших показателей её качества. Одним из очевидных признаков соответствия модели объекту-оригиналу является подобие их свойств. Например, периодичность (колебательный процесс) адекватно выражается тригонометрическими функциями, скорость в задачах динамики – первой производной непрерывной функции, а ускорение – её второй производной. Принцип прямого подобия реализуется на аналоговой вычислительной технике. Появление компьютеров нарушило принцип прямого подобия в силу самой дискретности их функционирования. Для решения задач функционального анализа были разработаны численные методы. Для вычисления значений неэлементарных функций применяются, как правило, итеративные алгоритмы. Имитационные и многоагентные модели сложных систем ещё реализуют принцип структурного и функционального подобия с системой оригиналом так же, как и модели более примитивных объектов. Однако этот принцип уже не реализуем в нейросетевых моделях вычислительного интеллекта. Причина этого очевидна. Умственная деятельность, выполняемая нейронами человеческого мозга, не имеет прямого соответствия моделируемым ею системам. В этом и заключается основная проблема конструирования нейросетевых моделей. Поскольку процесс решения конкретной сложной задачи человеческим мозгом в

настоящее время неизвестен, учёные избрали эмпирический (опытный) подход к созданию архитектуры нейросетевых моделей. Таким образом, подобие в способах реализации функций объекта не является универсальным показателем адекватности модели. Отсюда логичен переход от подобия в реализации функций к подобию самих функций, т. е. переход к модели чёрного ящика, оперирующего только вход-выходными последовательностями. Его называют также гештальт-моделью в силу целостного взгляда на объект моделирования.

Достоверность результата конкретизируется относительно типа решаемой задачи: точность для численных задач; отношение к глобальному оптимуму для оптимизационных задач; вероятность при решении статистических задач; коэффициент уверенности при решении логических задач. Точность решения численной задачи определяется числом знаков после запятой. На точность результата влияет число итераций. Достоверность результата распознавания определяется вероятностью правильного распознавания анализируемой сущности. На вероятность правильного распознавания символа влияет состав и мощность обучающей выборки, а также количество итераций (эпох) обучения модели. Таким образом, достоверность результата связана с трудоёмкостью его получения. В задачах с высокой степенью неопределённости отсутствует база объективного сравнения. Иными словами, в момент получения результат просто не с чем сравнивать. Применяемые методы формализации неопределённости позволяют только вычислить коэффициент уверенности или степень риска. В этих условиях достоверность результата оценивается путём получения его разными методами. Возникает вопрос: «А можно ли сравнить качество нейросетевой модели с качеством модели другой природы?». На этот вопрос можно ответить утвердительно, если представить сопоставляемые модели как оптимизационные. Действительно, достоверность результата, получаемого с помощью нейросетевой модели, зависит от 4 качества её обучения. А задача обучения нейросетевой модели относится к классу задач оптимизации. Она формулируется как задача минимизации интегральной ошибки при обучении с учителем. Эта ошибка, как известно, определяется объёмом и качеством обучающей выборки. С другой стороны, алгоритмы решения задач классическими методами также можно рассматривать как задачи оптимизации получаемого результата. Его достоверность (точность решения задачи) определяется объёмом итераций.

Для оценивания качества задач оптимизации привлекаются следующие критерии: 1. Точность поиска – значение окрестности локального оптимума, в которую приводит алгоритм после выполнения заданного числа итераций. 2. Скорость сходимости – число итераций, необходимое для достижения заданной точности. 3. Время счёта – время поиска на ЭВМ локального оптимума с заданной точностью, отнесенное к коэффициенту сложности задачи (или к быстродействию ЭВМ). 4. Стабильность – свойство алгоритма незначительно увеличивать число итераций при малых возмущениях

выбора начальных точек, а также вследствие погрешности вычислений. 5. Надежность – свойство алгоритма приводить к оптимуму при многократном повторении поиска из разных начальных точек.

Решается проблема разработки модели под новую задачу. Предложено два (или более) проекта моделей. Составлены технические задания на их разработку. Функциональность моделей одинакова, т.е. они в равной мере адекватны решаемой задаче. Доказана соизмеримая достоверность результатов решения задачи. Каждый разработчик расхваливает свой проект. Перед лицом, принимающим решение (ЛПР), возникла проблема выбора наиболее приемлемой модели. Его интересуют, прежде всего, временные затраты на проектирование и применение модели. При такой постановке задачи модель оценивается по этапам жизненного цикла. Каждому этапу предьявляется частная цель и задаётся важность. При многократном решении типовой задачи к наиболее важным этапам относятся ввод исходных данных и время решения задачи. Если задача уникальная, то к наиболее важным относят первые два этапа жизненного цикла модели. При ограниченности ресурсов ЛПР может оценивать этапы жизненного цикла моделей по трудоёмкости в человеко-часах или человеко-днях. Может принять комплексный вариант оценивания, охватывающий как трудоёмкость, так и время выполнения этапов.

Методы критериального выбора оценивают объекты по значениям критериев. Они ограничиваются использованием порядковой шкалы и исчислением предикатов. Методы функционального выбора оценивают объекты по значениям функций, созданных на основе критериев или по предпочтениям экспертов. Они используют численные шкалы и вычислительные операции. Выбор метода осуществляется в зависимости от особенностей решаемой задачи, ресурсов ЛПР и требования к достоверности результатов. Под ресурсами ЛПР понимается время, выделенное на решение проблемы, и финансы, требуемые на создание модели выбора. Методы критериального выбора обычно применяются для моделей выбора, содержащих малое число признаков с малым числом качественных значений. Увеличение числа признаков влечёт увеличение мощности множества Парето. Получение линейного порядка на множестве альтернатив связано с увеличением объёма экспертных оценок. Методы функционального выбора ориентированы на большое число признаков с численными значениями. Они гарантируют получение линейного порядка на множестве альтернатив, но требуют дополнительной информации для реализации. К ней относится выбор шкал признаков, задание их важности, выбор функций, отображающих значения признаков в абсолютную шкалу и выбор вида обобщающей функции. В направлении усложнения различают: функции достижения идеальной и реальной цели, функции отклонения от цели и функции полезности. Линейная функция достижения идеальной цели представляет собой нормирующую функцию целевого критерия. Кусочно-линейные функции достижения реальной цели и отклонения от цели формируются на основе ограничительного критерия.

Нелинейная функция полезности отражает предпочтения эксперта о полезности делений на шкале признака и требует наиболее глубокого проникновения в суть задачи выбора.

Применительно к задаче оценивания качества моделей методы критериального выбора представляются неперспективными, поскольку эта задача требует установления линейного порядка на множестве и характеризуется не менее чем четырьмя признаками, измеренными в различных числовых шкалах. Выбор подходящего метода функционального выбора определяется глубиной проникновения в решаемую задачу. Название «квалиметрия моделей» буквально означает измерение качества моделей. Качество модели характеризуется её соответствием поставленной задаче, трудоёмкостью и достоверностью результатов моделирования. По отношению к общей цели моделирования эти факторы рассматриваются как частные цели. В свою очередь, они детализируются на более конкретные цели. В итоге создаётся дерево целей. Его висячие (листовые) вершины представляют собой измеряемые параметры. А это позволяет применять методы многокритериальной оптимизации для вычисления количественной оценки качества оцениваемой модели. Если заданы нормативы каждого параметра, появляется возможность оценить степень соответствия обобщённой по всем параметрам норме. Если существует более одной модели, применимой для решения задачи моделирования, то количественная оценка их качества позволяет выбрать наиболее приемлемую модель для решаемой задачи. Важнейшим показателем качества модели является её адекватность поставленной задаче. От неё зависит и достоверность результатов моделирования. В том случае, когда модель отражает не все свойства объекта-оригинала или отражает их не полностью, имеет место частичное соответствие модели решаемой задаче. Это снижает достоверность результатов моделирования. Поэтому при усреднении частных оценок качества модели показателем адекватности выделяется наибольшая важность. При равноценной адекватности сопоставляемых моделей поставленной задаче существенную роль играют требования к её размерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андрианов Ю.М., Суббето А. И. Квалиметрия в приборостроении. Л. Машиностроение, 1990. 216 с.
- [2] Звягин Л.С. Методы теории нечетких множеств в аспекте оценки экономической эффективности и инвестиционных проектов в условиях неопределенности// Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2015. Т. 2. С. 153-158.
- [3] Звягин Л.С. Оценка и моделирование показателей трудового потенциала территории средствами системы "Инфоаналитик"// Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2012. Т. 2. С. 39-44.
- [4] Юсупов Р.М., Иванищев В.В., Костельцев В.И., Суворов А.И. Принципы квалиметрии моделей // IV СПб Международная конференция «Региональная информатика-95», тез. докладов. СПб, 1995.
- [5] Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.