

ТЕОРИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РИШЕНЬ

В работе анализируются современные тенденции и проблемы в области оптимизации имитационного моделирования. Рассмотрены методологические, структурно-организационные и прикладные аспекты указанных проблем. Определены перспективы развития данного направления.

© В.А. Пепеляев, 2003

Теорія оптимальних рішень. 2003, № 2

УДК 681.3.06 + 519.8

В.А. ПЕПЕЛЯЕВ

К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕГРАЦИИ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Введение. Одной из основных тенденций в области имитационного моделирования в настоящее время является разработка и внедрение имитационных систем, включающих в свою программную среду методы оптимизации. Оптимизационно-имитационная интеграция обусловлена прежде всего насущной необходимостью решать проблемы исследования сложных систем в таких областях приложений как, например, современное производство, маркетинг, логистика и управление финансами. В силу сложности, нелинейности и неопределённости, присущих указанным системам, и, как следствие, отсутствия соответствующих математических формулировок, в качестве наиболее приемлемой и эффективной методологии решения возникающих здесь проблем используется имитационное моделирование – традиционный инструментарий исследования такого рода систем. Ещё одной отличительной особенностью процессов исследования представленных выше систем является наличие большого числа взаимосвязанных альтернатив, требующих рассмотрения. И в этом отношении имитационное моделирование располагает ограниченными возможностями, поскольку может предложить только метод последовательного

перебора множества альтернатив на основе разработки многочисленных сценариев экспериментов. Последнее приводит к тому, что принятие решений по определению и оценке наилучших (или близких к наилучшим) вариантов фактически не может быть достигнуто во многих приложениях прежде всего из-за больших объемов вычислений. Естественным выходом здесь является комбинирование методов оптимизации и имитационного моделирования, что в свою очередь требует решения проблем их интеграции [1].

В зарубежной практике имитационного моделирования в последние десять лет получила развитие и применение концепция оптимизации имитационного моделирования (simulation optimization), на базе которой в США разработаны такие системы (пакеты) как AutoStat, OptQuest, OPTIMIZ, SimRunner2, WITNESS Optimizer [2-6]. Например, система OptQuest использовалась в нескольких тысячах реальных приложений, которые комбинировали имитационное моделирование и оптимизацию. На зимних конференциях по имитационному моделированию (Winter Simulation Conference) 2000-2002 гг. были организованы специальные секции и проводились дискуссии применительно к проблемам оптимизации имитационного моделирования, на которых с докладами выступали разработчики вышеуказанных систем и специалисты по методологическим, структурно-организационным и прикладным аспектам задач создания интегрированных сред моделирования.

Заметим, что в Институте кибернетики им.В.М.Глушкова НАН Украины в середине 80-х годов под руководством академика Ю.М.Ермольева и член-корреспондента Т.П. Марьяновича проводились исследования по вопросам интеграции методов оптимизации и моделирования. Развитая при этом концепция направленных имитационных экспериментов, являющаяся аналогом оптимизации имитационного моделирования, нашла применение при разработке диалоговой системы поддержки направленных имитационных экспериментов. В качестве имитационной компоненты использовалась созданная в институте система моделирования НЕДИС [7,8]. В связи со стремительной сменой поколений систем моделирования, парадигм программирования и вычислительной базы указанная концепция не получила достаточно широкого распространения.

В настоящее время, когда в экономике Украины на передний план выходят такие задачи первостепенной важности, как исследование транспортных сетей и коридоров, многофункциональных сложных систем (например, морских портов Украины), актуальными становятся проблемы разработки отечественных систем моделирования, базированных на методах оптимизации. Последнее особенно важно в условиях финансовых затруднений с приобретением их зарубежных аналогов и отсутствия соответствующих отечественных разработок.

Целью настоящей работы является анализ современных тенденций в области оптимизационно-имитационной интеграции и определение задач их перспективного развития на основе как зарубежного, так и отечественного опыта.

Предварительно дадим определение самой концепции оптимизации имитационного моделирования. Оптимизация имитационного моделирования есть процесс нахождения наилучших значений переменных из заданного множества (decision variables), которые вычисляются как выходы имитационной модели исследуемой системы и на множестве которых принимаются соответствующие проектные решения.

Для понимания актуальности рассматриваемой проблематики проанализируем причины повышенного интереса, особенно в последние годы, к проблемам оптимизационно-имитационной интеграции.

Одной из основных тенденций в области разработки и внедрения современных систем менеджмента бизнес-процессов является использование имитационного моделирования в качестве их неотъемлемой составляющей. "Встроенные" в менеджмент бизнес-процессов системы имитации обеспечивают решение таких важных задач как контроль проектов, планирование ресурсов, контроль бизнес-правил, прогноз инвестиций на основе анализа по схеме "что-если" ("what-if"), обучение в новых / реорганизованных бизнес-процессах, планирование сценариев для чрезвычайных ситуаций. Причём общепринятой является точка зрения, что имитационное моделирование должно сопровождать бизнес-процессы с самой начальной стадии их становления, развития и внедрения.

Подтверждением указанной тенденции могут служить примеры таких известных систем моделирования как SIMUL8 (SIMUL8 Corporation), AutoMod (Brooks Automation), Promodel (Promodel Corporation) и WITNESS (Lanner Group Incorporated).

SIMUL8 разрабатывает, поставляет на рынок и поддерживает системы имитационного моделирования, ориентированные на решение задач бизнеса, правительства, образования и организаций, которые сталкиваются с проблемами управления потоками заказов, клиентов, транспорта или продукции. За сравнительно короткий период, начиная с момента основания в 1994 году, корпорация сумела включить в число своих пользователей очень многие солидные фирмы: IBM, Bell Laboratories, Motorola, Ford Motor Company, Boeing Aircraft, British Airways, Virgin Atlantic, Hewlett-Packard Corporation, USA Air Force, British Steel и Nissan Motors.

Системы моделирования AutoMod, Promodel и WITNESS также нашли широкое применение в различных прикладных областях (производство, бизнес, склады, логистика, транспорт, фармацевтическое производство, реинжиниринг в бизнесе) и обрели серьёзных пользователей в лице таких фирм, как General Electric, Intel, Siemens, Nokia, Motorola и др.

В свою очередь, столь солидные пользователи выдвинули серьёзные требования к качеству и эффективности систем моделирования. Прежде всего, это

обеспечение возможности получения соответствующих выгод от использования систем моделирования в бизнес-процессах за сравнительно небольшую цену.

Естественно, что в таких условиях особенно актуальным становится вопрос об использовании методов оптимизации в практике имитационного моделирования, с одной стороны для получения оптимальных или близких к оптимальным характеристикам исследуемых систем и процессов, а с другой стороны – для значительного сокращения числа, и, как следствие, стоимости имитационных экспериментов за счёт направленного поиска указанных характеристик.

Таким образом, у разработчиков систем имитационного моделирования возникла проблема выбора соответствующих оптимизационных стратегий. Каждая из вышеуказанных корпораций по-своему подошла к её решению.

Корпорация SIMUL8 использовала для этих целей разработки фирмы OptTek Systems.

Следует заметить, что в мировой практике разработки различного рода оптимизационных стратегий одним из признанных лидеров является фирма OptTek Systems, основанная в 1992 году Фредом Гловером. В настоящее время фирма выступает в роли главного провайдера оптимизационного программного обеспечения моделирующим компаниям и внедряет методы искусственного интеллекта, базирующиеся на многолетнем опыте исследований в области оптимизации. Программное обеспечение OptTek (прежде всего, сугубо оптимизационный пакет OptQuest) используется многими компаниями для разработки приложений в области финансов, логистики, промышленного планирования и телекоммуникаций. OptQuest базируется на трёх стратегиях оптимизации: рассеянный поиск (scatter search), ограниченный поиск (tabu search) и механизм нейронных сетей. OptQuest способна реализовать ряд имитационных экспериментов на основе оптимальных или близких к оптимальным сценариям принятия решений.

В декабре 2001 года OptTek и SIMUL8 объединили свои усилия по созданию программного модуля оптимизации OptQuest for SIMUL8. Этот продукт направлен на усиление возможностей пользователей в проблемах принятия решений с улучшением качества решений и существенным уменьшением времени исследований в области исследований, где скорость является критическим фактором.

В состав системы AutoMod включён модуль AutoStat, обеспечивающий как решение оптимизационных задач, так и эффективное управление процессом моделирования дискретных и непрерывных систем. Корпорация Brooks Automation объединила свои усилия с SIMUL8 Corporation для расширения возможностей программного обеспечения системы AutoMod.

В рамках систем WITNESS и Promodel были разработаны специальные оптимизационные модули WITNESS Optimizer и SimRunner2 соответственно.

Пакет SimRunner2 базируется на платформе системы Promodel, которая разработана специально для производственных компаний. Основное назначение системы – превратить имитационное моделирование в стандартный инструментарий получения прозрачных, релевантных и выгодных ответов для инженеров, менеджеров и системных аналитиков. SimRunner2 поддерживает решение оптимизационных задач на двух уровнях. Первый уровень Stage One Optimization Analysis обеспечивает получение оценок влияния отдельных факторов на функции цели. Второй уровень Stage Two Optimization Simulation ориентирован на многофакторную оптимизацию и испытывает различные комбинации входных параметров для обеспечения наилучших значений функций цели за приемлемое время.

WITNESS Optimizer не только обеспечивает поиск оптимальных решений, но также осуществляет их быстрый статистический анализ.

Как показал анализ вышеописанных оптимизационно-имитационных систем, методологическую основу интегрированных сред имитационного моделирования составляют используемые стратегии оптимизации и соответствующие системы моделирования, ориентированные на исследования различного рода процессов (дискретно-событийных, непрерывных или непрерывно-дискретных). В свою очередь каждая стратегия оптимизации базируется на соответствующих методах поиска оптимальных решений.

Наиболее используемые в настоящее время подходы к реализации оптимизационных стратегий могут быть классифицированы следующим образом:

- градиентно-базированные алгоритмы (стохастическая оптимизация (stochastic approximation)) и алгоритмы случайного поиска (random search);
- эволюционные алгоритмы (evolutionary algorithms) и метаэвристики (генетические алгоритмы (genetic algorithms), методы по типу табу (tabu search), рассеянный поиск (scatter search), метод отжига (annealing simulation);
- базированные на математическом программировании ;
- средства статистического поиска, например такие, как ранжирование & выбор (ranking & selection), множественное сравнение (multiple comparison).

Следует заметить, что именно второй подход является широко используемым в практике решения оптимизационно-имитационных задач.

Перечень современных стратегий оптимизации применительно к вышерассмотренным оптимизационно-имитационным системам представлен в табл. 1.

Заметим, что приведенный в табл.1 список оптимизационно-имитационных систем не является исчерпывающим. Известно, что разработчики таких систем Arena и Crystal Ball планируют использовать подход OptQuest в оптимизационных стратегиях.

ТАБЛИЦА 1. Современные оптимизационные стратегии

Оптимизационный пакет (платформа моделирования)	Первичная стратегия поиска
AutoStat (AutoMod)	Эволюционные алгоритмы, генетические алгоритмы
OptQuest for SIMUL8 (SIMUL8)	Нейронные сети, поиск с ограничением, рассеянный поиск
SimRunner (Protomodel)	Эволюционные алгоритмы, генетические алгоритмы
Optimizer (WITNESS)	Метод отжига поиск с ограничением

К числу наиболее важных проблем разработки интегрированных сред имитационного моделирования относится выбор схемы взаимодействия между оптимизационными компонентами и имитационной моделью [9]. Наиболее известные подходы к решению данной проблемы графически представлены на рис.1 и рис.2.

В первом случае (рис.1) используется так называемый универсальный оптимизатор. Исследуемая система рассматривается как "чёрный ящик" по отношению к процедурам оптимизации. Преимуществом здесь является тот факт, что модель исследуемой системы может функционировать и изменяться независимо от используемых процедур оптимизации. В свою очередь, указанный оптимизатор можно использовать для различных моделей. Данная схема взаимодействия соответствует духу парадигмы компонентной архитектуры, согласно которой в схеме клиент-сервер от клиента закрыта архитектура особенностей реализации сервера, осуществляющего обслуживание клиента в соответствии с опубликованными услугами и возможностями.

Заметим, что системы SimRunner и OptQuest реализованы согласно этой схеме.

В основе второго подхода (рис.2) лежит идея проблемно-ориентированного оптимизатора, который использует проблемно-ориентированную информацию и

предусматривает взаимодействие с имитационной моделью. На базе текущих откликов имитационной модели и предыдущих результатов оптимизационная процедура решает вопрос о новом множестве входных данных для имитационной модели. Такой процесс, как правило, завершается при достижении условий априорно заданного критерия.



РИС.1. Сложная система как чёрный ящик



РИС.2. Координация между оптимизатором и имитационной моделью

Вторая схема взаимодействий принята в системах AutoStat и WITNESS Optimizer.

Классическая постановка проблемы оптимизации для вышепредставленных стратегий представляется следующим образом.

Рассмотрим дискретно-событийную имитационную модель, для которой определены p детерминированных входных параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ и q стохастических выходных переменных $Y = (y_1, y_2, \dots, y_q)$, где Y являются функциями от X ($Y = Y(X)$). Предположим, входные параметры определены в ограниченной области возможных значений. Определяем вещественную функцию $S(Y)$, которая комбинирует выходные данные в единую стохастическую выходную переменную, именуемую функцией цели $F(X)$, которую необходимо оптимизировать.

Детерминированные входные параметры могут быть или непрерывными, или дискретными. В случае непрерывных входных параметров для оптимизации функции цели используются градиентно-базированные стратегии. Для случая дискретных входных параметров – другие вышепредставленные стратегии.

Важно отметить, что решение задач оптимизации на основе имитационных моделей должно осуществляться в два этапа. На первом этапе решается задача оценки достоверности имитационной модели, что, как правило, требует проведения

многочисленных чисто имитационных экспериментов. По ходу таких экспериментов должна быть определена длина интервала разгона модели, а также доверительный интервал моделирования. И только после получения удовлетворительных оценок достоверности имеет смысл начинать поиск оптимальных решений.

В отличие от традиционного процесса имитационного моделирования процесс оптимизации осуществляется так называемыми сеансами моделирования, в каждом из которых реализуется многократный прогон имитационной модели на основе двухуровневого сценария. Первый уровень поддерживает собственно прогон имитационной модели, а второй (расширенный) – обеспечивает решение оптимальной задачи. Здесь важным моментом является совместимость входных условий, альтернатив и ограничений для имитационной модели и процедур оптимизации, принятых в рамках поставленной оптимизационной задачи.

Выводы. Традиционное использование имитационного моделирования для получения оптимальной версии исследуемой системы фактически требует (даже в случае простой системы) разработки многих проектов и, как следствие, больших вычислительных ресурсов.

Для решения проблем оптимизации моделирования были разработаны различные подходы, включая как строго математические методы, так и чисто эвристические подходы.

Вся трудность использования этих методов пользователями заключается в том, что от них требуются понимание как специфики методов оптимизации, так и методов имитационного моделирования. Поскольку многие методы оптимизации обеспечивают медленную сходимость, то на практике большинство пользователей обращается к эвристическим подходам, которые хотя и обеспечивают быстрое решение, но безо всякой гарантии их качества.

Анализ основных проблем в области оптимизационно-имитационной методологии показал, что тенденция к разработке интегрированных сред моделирования остаётся актуальной. Одной из основных текущих проблем здесь является повышение эффективности процессов оптимизационно-имитационного моделирования, которая может быть достигнута на основе следующих подходов:

- разработки простых, прозрачных и точных математических методов. В частности, очень важно развивать универсальные методы, пригодные для решения широкого класса проблем в оптимизации моделирования;
- введения методов оптимизации в виде соответствующих структур в языки моделирования;
- разработки проблемно-ориентированных методов, обеспечивающих ускорение получения результатов;

- разработки таких научных методов оптимизации моделирования, которые могут быть востребованы специалистами-экспертами для решения специфических проблем оптимизации с высокой эффективностью;

- использования технологии распределённых вычислений для повышения скорости решения задач оптимизации.

Перспективные исследования в области оптимизации имитационного моделирования требуют решения следующих проблем:

- разработка отечественного аналога системы оптимизации имитационного моделирования. При этом компонента-оптимизатор должна поддерживать как зарубежные, так и отечественные, в том числе созданные в Институте кибернетики, стратегии оптимизации. В качестве базовой системы моделирования целесообразно использовать разработанную в Институте кибернетики систему имитационного моделирования, поддерживающую создание и реализацию как последовательных, так и распределённых приложений [10];

- разработка методолого-технологических стандартов создания и реализации приложений, функционирующих в рамках интегрированных сред моделирования;

- разработка методологических основ реализации оптимизации моделирования на базе технологий распределённых вычислений;

- применение оптимизационно-имитационной методологии в практике исследования сложных систем, имеющих важное значение для экономики Украины.

В.А.Пепеляев

ДО ПИТАННЯ ПРО ІНТЕГРАЦІЮ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В роботі аналізуються сучасні тенденції та проблеми в галузі оптимізації імітаційного моделювання. Розглянуті методологічні, структурно-організаційні та прикладні аспекти зазначених проблем. Окреслені перспективи розвитку даного напрямку.

V.A.Pepeljaev

ABOUT INTEGRATION OF OPTIMIZATION METHODS AND SIMULATION

In the report the modern tendencies and problems in simulation optimization are analyzed. The methodological, organization and applied aspects of such problems are considered. The perspectives of the given branch development are determined.

1. *Integrating optimization and simulation: research and practice* / Fu M.C., Andradóttir S., Carson J.S. and others // *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. – 2000. – P. 610–616.
2. *Fu M.C. Simulation optimization* // *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. – 2001. – P. 53–61.
3. *Ólaffson S., Kim J. Simulation optimization* // *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. – 2002. – P. 79–84.

4. *Glover F., Kelly J.P., Laguna M.* New advances for wedding optimization and simulation optimization // *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference.* – 1999. – P. 255–260.
5. *Law A.M., McComas M.G.* Simulation-based optimization // *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference.* – 2002. – P. 41–44.
6. *A survey of simulation optimization techniques and procedures / April J., Glover F., Kelly J. and others* // *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.* – 2000. – P. 119–128.
7. *Ермольев Ю.М., Марьянович Т.П.* Оптимизация и моделирование // *Проблемы кибернетики, вып.27.* –1977. – С. 111–125.
8. *Марьянович Т.П., Распопов В.Б.* Діалогова система направленої імітаційного моделювання // *Вісник АН УРСР, 1979.* – № 1. – С. 16–23
9. *Simulation/optimization using "real-world" applications / April J., Glover F., Kelly J. and others* // *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.* – 2001. – P. 134–138.
10. *Галаган Т.Н., Гусев В.В., Яценко Н.М.* Реалізація мови розподіленого моделювання систем з дискретними подіями // *"Технології розподілених обчислень в імітаційному моделюванні".* – К.: – Ін-т кібернетики ім.В.М.Глушкова НАН України. – 2001. – С. 15–23.

Получено 11.09.2003