

И.Е. Смирнов

Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти

Интерактивное картографическое моделирование с использованием интервальных данных на основе программирования в ограничениях

Рассматривается применение метода недоопределенных моделей в геоинформационных системах. Благодаря его использованию открывается возможность представлять более широкий класс данных на карте и использовать их в вычислениях с интерактивным отображением результатов.

Ключевые слова: геоинформационные системы, метод недоопределенных моделей, визуализация.

I. Введение

В последние годы в области разработки геоинформационных систем (ГИС) можно наблюдать тенденцию перехода от отдельных монолитных автономных приложений, основанных на клиент-серверной архитектуре, к веб-приложениям и компонентам, построенным на базе веб-модели — WebGIS. Эти системы получили широкое распространение благодаря тому, что они позволили обеспечить удобную работу с интегрированными данными, географическую доступность без риска устаревания информации и изолированности [1, 2].

Однако известные системы такого рода далеко не во всем отвечают практическим потребностям. В значительной мере это касается их аналитического инструментария. На этапе построения модели фактором, определяющим эффективность всей процедуры обработки и анализа пространственных данных, является «интеллектуальная» мощность средства моделирования, используемого при создании математической модели процесса.

Одним из факторов, влияющих на адекватность разрабатываемой модели моделируемому объекту, который до настоящего времени мало исследован, является возможность учёта неточного характера информации о ряде параметров модели. В этой связи представляется необходимым иметь в наличии универсальный подход к интеграции двух составляющих — вычислений с использованием интервальных параметров и собственно ГИС-функционала.

Данное обстоятельство послужило отправной точкой излагаемой ниже разработки, при выполнении которой автор стремился усовершенствовать технологию картографического моделирования.

Данная разработка, сохраняя преимущества существующих систем картографического моделирования, открывает принципиально новые возможности по использованию в этих системах реальной информации, включая информацию, обработка которой традиционными средствами либо сложна, либо вообще невыполнима.

II. Недостатки существующих систем картографического моделирования

Прежде всего обратим внимание на ряд особенностей существующих систем картографического моделирования.

Такие системы тяготеют к определенности используемой информации. Неточность и оценочный характер информации рассматриваются в таких системах как нечто нежелательное (хотя и возможное), как некое отступление от идеала. Неточности исходных данных и расчетных зависимостей при этом в худшем случае игнорируются, в лучшем — учитываются с использованием дополнительных допущений.

Неоднозначные задачи существующими системами моделирования не решаются, и в тех случаях, когда задача имеет много вариантов решения, каждый вариант задачи надо рассматривать

отдельно. В случае большого числа вариантов это ведет к выбору нескольких типовых из их числа, а остальные оказываются вне детального рассмотрения.

Попытки рассмотрения переопределенных (с избыточными условиями) и недоопределенных (с неполными условиями) задач с точки зрения идеологии традиционных систем моделирования считаются некорректными.

Обычные средства картографического моделирования предполагают четкое разделение входов и выходов модели, отвечающих определенному алгоритму решения, причем алгоритм выступает как существенная часть модели. Разработка алгоритма расчета временами оказывается более трудоемкой, чем составление остальной модели, а изменение модели требует, как правило, изменения алгоритма.

Перечисленные особенности существующих систем картографического моделирования выглядят привычными и на первый взгляд даже неустраимыми. Но данные особенности не отвечают потребностям решения реальных задач, а их кажущаяся «естественность», как это бывает в таких случаях, перестаёт быть таковой, когда появляется новый более мощный инструмент.

Для многих ситуаций картографического моделирования неточность и оценочный характер используемой информации — норма, а не исключение. Учет неточности исходных данных и расчетных зависимостей с помощью дополнительных допущений лишь усложняет расчет и создает опасность выбора неоправданных допущений.

Неоднозначные и многовариантные задачи в реальных ситуациях возникают весьма часто. Замена полного перебора вариантов рассмотрением нескольких типовых вариантов — плохой способ, так как при этом есть риск упустить из виду важный, но неочевидный вариант решения.

Задачи с избыточными условиями и неполными условиями обычны для практической деятельности.

Разделение входов и выходов модели серьезно мешает моделированию, так как в процессе решения модельной задачи нередко возникает необходимость изменить не только входные, но и выходные данные. Очевидной помехой моделирования является также необходимость разрабатывать для модели алгоритм расчета.

Сказанное позволяет понять представленные ниже требования к разработке, которыми руководствовался автор.

Дополнительные требования к ГИС-системам, необходимые для работы с недоопределёнными данными.

Помимо обычных требований к ГИС-системам, в рамках предлагаемой разработки были сформулированы следующие новые требования:

- простой и наглядный учет неточности исходной информации моделирования и получаемых в результате расчета результатов без введения дополнительных допущений,
- решение неоднозначных задач,
- рассмотрение многовариантных задач без риска упустить из виду какой-либо вариант,
- возможность рассмотрения переопределенных и недоопределенных задач,
- отказ от разделения входов и выходов модели, возможность любой показатель модели использовать и как входной, и как выходной,
- составление и корректировка модели не должны требовать разработки или корректировки алгоритма расчета — алгоритм должен автоматически формироваться компьютером.

Прежде всего было обращено внимание на достижение простого и наглядного учета неточности исходной информации моделирования и получаемых в результате расчета результатов. С этой целью было выбрано интервальное (от ... до...) представление показателей. Оно достаточно удобно как для учета неточностей статистической природы (в форме доверительных интервалов), так и для учета неточностей нестатистического характера (например, для работы с экспертными оценками).

Анализ описанных выше требований привел к выводу о целесообразности положить в основу разрабатываемой системы синтез элементов метода недоопределенных моделей и развитого программного обеспечения одной из доступных ГИС-систем.

Обоснование использования метода недоопределенных моделей в рамках проведенной разработки.

Метод недоопределенных моделей является разновидностью программирования в ограничениях — весьма перспективного подхода, который основан на описании модели задачи, а не алгоритма ее решения [3–4].

Недоопределенность в методе — свойство данных и знаний, определяемое как частичное знание о сущности x , ограниченное информацией о том, что x принадлежит к некоторому конкретному множеству X . Уточнение данных об x приводит к сокращению множества X , в потенциале стягивающемуся до одного элемента, отображающего полную информацию об x .

Модель в методе представляется в виде неупорядоченной совокупности отношений, которые соответствуют связям, существующим между параметрами задачи. Такие отношения, называемые общим термином «ограничения», могут иметь вид уравнений, неравенств, логических выражений и т.п. Набор значений переменных удовлетворяет ограничению, если после подстановки данных значений в ограничение значение этого ограничения как булевского выражения есть «истина». Например, значения переменных $x = 2$, $y = 2$ удовлетворяют ограничению $xy < 2^{x+y}$.

Примером решаемой с помощью метода модели может служить следующая трудная для традиционных методов система условий:

$$3 \cdot \ln(x) + (\sin(x))^3 + \cos(y) = 1,0;$$

$$0,5 \cdot \operatorname{tg}(EXP^{(y-x)} \cdot x^3) - \cos(x) = 4.$$

Решение данной модели (после поиска корней):

$$x = 1,035626, \quad y = 1,309305;$$

$$x = 1,246853, \quad y = 2,110413.$$

Наиболее привлекательной с точки зрения рассматриваемой задачи совершенствования ГИС-систем является та особенность метода недоопределенных моделей, что процесс вычислений в этом методе можно представить как взаимное согласование всех моделируемых показателей, причем согласование сопровождается сужением пространства решений до тех пор, пока в результате не останется область, совместимая со всеми условиями поставленной задачи. По каждому из моделируемых показателей указанная область может быть бесконечным интервалом (если данные для уточнения показателя полностью отсутствуют), конечным интервалом, точным числом (если задача допускает точное и однозначное решение) или пустым множеством (если решения нет).

Такой процесс вычисления позволяет:

- без введения дополнительных допущений на основе любой имеющейся исходной информации (точные данные, интервальные оценки данных, уравнения и неравенства с точными либо интервальными параметрами, логические условия) находить результирующие оценки всех рассматриваемых показателей — в частности, могут уточняться интервалы исходных показателей;
- легко решать неоднозначные задачи (решение по каждому показателю есть интервал, содержащий все частные решения задачи);
- решать многовариантные задачи без риска упустить из виду какой-либо вариант (все множество вариантов решения, даже бесконечное, описывается одним общим решением, включающим все решения, совместимые с условиями задачи, в том числе неочевидные варианты решений);

- рассматривать переопределенные задачи (если избыточные условия уточняют друг друга, то получается уточненное решение, а если избыточные условия противоречат друг другу, то противоречия автоматически выявляются) — в частности, можно задавать для каждого показателя несколько расчетных формул, которые должны выполняться одновременно;
- решать недоопределенные задачи (недоопределенность отразится на ширине расчетных интервалов);
- использовать любой показатель модели и как входной, и как выходной (в процессе взаимного согласования все показатели равноценны);
- не разрабатывать алгоритм расчета (при использовании программных средств метода недоопределенных моделей все необходимые для расчета процедуры автоматически выбираются компьютером).

В качестве дополнительного достоинства метода недоопределенных моделей отметим возможность использовать неупорядоченные системы линейных и нелинейных уравнений и неравенств, включая неявные зависимости, связывающие рассматриваемые переменные.

III. Архитектура и новые функции геоинформационной системы на основе метода недоопределенных моделей

В настоящее время существует значительное количество ГИС-систем (ESRI, Pitney Bowes Software и др.), размещаемых на веб-серверах. Поскольку на данном этапе разработки и исследования перед автором стояла задача исследовать принципиальную возможность использования аппарата недоопределенных моделей в интерактивном картографическом моделировании, выбор конкретной ГИС определялся в первую очередь соображениями наличия удобного интерфейса для интеграции, а также доступностью используемой ГИС. Была выбрана картографическая платформа WebMap, так как она позволяет встраивать средства просмотра и редактирования интерактивных карт в Windows- и веб-приложения самого разнообразного назначения и используется для создания многофункциональных корпоративных ГИС-решений, предусматривающих доступ пользователей к картам, планам и связанной с ними информации.

В соответствии с особенностями платформы WebMap интерактивность взаимодействия с картой в рамках предлагаемой разработки осуществляется за счет обработки так называемых событий. При этом API предоставляет собственный интерфейс для обработки и создания обработчиков событий карты. Например, для карты можно добавить дополнительные пользовательские действия, которые будут срабатывать при перемещении карты, заполнении текстовых полей, выборе объектов и т.д. Здесь с помощью JavaScript реализована отсылка введенных данных на вход вычислительного ядра. После вычислений результаты выводятся на карту.

Для упрощения выполнения основных задач, таких как обращение к основным объектам карты, в приложении может быть использована библиотека jQuery. Объем кода, необходимого для взаимодействия с веб-сервером, в таком случае заметно сокращается. Чтобы исключить лишние перезагрузки веб-страницы, используется API jQuery для работы с технологией AJAX.

Данные, отправляемые пользователем, обрабатываются на сервере с помощью скрипта, реализованного на серверном языке программирования. В зависимости от контекста выбирается способ обработки, затем на основе этих данных формируется недоопределенная модель и происходит запуск вычислений. Результат вычислений приводится к виду, удобному для дальнейшей обработки с помощью JavaScript (получение минимального и максимального значений недоопределенной переменной и т.п.). После нее происходит обновление параметров отображаемых объектов с помощью jQuery- и API-карты. Данные, не отображаемые непосредственно на карте, могут быть отображены отдельно.

Процесс вычислений имеет следующий вид. Допустим, некоторые параметры объектов, имеющих географическую привязку посредством метки, заданы интервальными значениями координат. Эти значения могут быть введены в текстовое поле рядом с меткой. После того как все подобные объекты и связанные с ними параметры нанесены на карту, производится запуск вычислений

модели, составленной заранее либо которая может редактироваться в окне в непосредственной близости к карте. В процессе уточнения области решений по методу недоопределенных моделей интервалы сужаются. В результате пользователь (при наличии соответствующих зависимостей в модели) будет получать на карте параметры с уточнившимися интервалами, в пределе — точные значения.

IV. Функциональные аналитические возможности ГИС-системы на базе метода недоопределенных моделей

Синтез элементов WebMap и метода недоопределенных моделей дает возможность ввести новые уникальные функции, отсутствующие в типовых ГИС-системах. Функциональные возможности синтезированной системы позволяют:

- использовать при картографическом моделировании как неполную и неточную, так и формально избыточную информацию, причем легко обнаруживаются противоречия в поступающих данных;
- автоматически уточнять используемые при картографическом моделировании приближенные данные и зависимости на основе взаимного согласования имеющейся информации, при этом обеспечивается адекватное отражение неполноты используемой информации как ширины расчетных интервалов;
- получать доступ к графическим и атрибутивным данным, программно редактировать с использованием метода недоопределенных моделей графическую и семантическую информацию во временных и хранимых таблицах, таблицах внешней СУБД, управлять всеми параметрами отображения карты и ее слоев, динамически включать и отключать отображение различных картографических слоев в соответствии с потребностями пользователей;
- использовать одни и те же моделируемые показатели как в качестве входных (известных), так и выходных (прогнозируемых);
- решать на основании точной либо приближенной, полной, неполной либо избыточной информации неоднозначные, многовариантные, переопределенные и недоопределенные прикладные задачи — например, задачи, связанные с выбором оптимальных маршрутов для транспортных средств по графу дорожного движения (WebMap Route), отображая и редактируя динамическую информацию по положению и состоянию транспортных средств;
- вводить условия, уточняющие неточно заданные показатели и отслеживать возникающие в результате изменения;
- создавать, сохранять или откатывать серверные транзакции, импортировать/экспортировать таблицы (в том числе интервальные) из(в) файлов(файлы) обменных форматов ГИС (MapInfo, ArcView);
- осуществлять поиск объектов по заданным экранным координатам, по названиям или иным атрибутам, в том числе по приближенно заданным координатам; осуществлять поиск ближайших объектов в заданном радиусе, а также производить адресный поиск по адресу, заданному в произвольном формате;
- Строить легенду карты, используя атрибутивные данные, в том числе интервальные.

Важнейшие функциональные особенности проведенной разработки поясняет табл. 1.

Сравнение функциональности подсистем ГИС

Функциональная подсистема картографической системы	Отличия от существующих типовых аналогов
Подсистема ввода числовых данных	Помимо обычных числовых значений данных позволяет вводить интервальные значения показателей. Обеспечена возможность задавать значения любого моделируемого показателя (а не ограниченной части показателей, предусмотренных на роль входных, как в обычных системах)
Подсистема ввода расчетных зависимостей	Позволяет задавать для каждого показателя несколько расчетных формул, которые должны выполняться одновременно
Подсистема вычислений	Реализует процедуру расчета по методу недоопределенных моделей. Решает неоднозначные, недоопределенные и переопределенные задачи
Подсистема управления	Обеспечивает автоматический выбор алгоритма расчетов без участия пользователя
Подсистема вывода информации	Осуществляет вывод информации как в виде точных числовых значений, так и в виде интервальных оценок. Обеспечивает сигнализацию о возникновении противоречий в условиях расчета

Пример работы ГИС-приложения на основе метода недоопределенных моделей.

Описанная выше функциональность была реализована в виде примера ГИС-приложения (рис. 1), в его основу были положены формулы из статьи [5], для использования которых характерно наличие интервальных параметров как следствия неполноты известных данных либо других причин. Приложение представляет собой систему для оценочного прогнозирования уровня наводнения, вызванного сейсмической морской волной. В расчете присутствуют параметры, отражающие информацию о наводнениях, имевших место в прошлом (рассматриваются различные параметры прибрежных глыб и скал), а сама разработанная в [5] методика позволяет предсказывать масштабы возможных будущих явлений. Основная расчетная формула статьи:

$$X_{\max} = D + (H_T - h_c)^{1,33} n^{-2} k \cos \alpha,$$

где X_{\max} — максимальное расстояние распространения наводнения от берега, D — расстояние от берега до глыбы, H_T — высота сейсмической волны, h_c — высота скалы, n — параметр Маннинга (топографическая величина), k — константа для наводнений, взятая равной 0.06, α — угол наклона берега.



Рис. 1. Пример ГИС-приложения на основе метода недоопределенных моделей. Топографические параметры интерактивно передаются в недоопределенную модель по нажатию на карту. Результат расчета — окружности, позволяющие оценить масштаб наводнения

Данной формуле сопоставим соответствующую недоопределенную модель. С учетом приведенных в статье [5] данных она может иметь вид:

$$X_{\max} = D + (H_T - h_c)^{1,33} n^{-2} k \cos \alpha,$$

$$D = [20,40], \quad H_T = [4,93,4,95], \quad h_c = [1,3,1,7], \quad n = [0,053,0,057], \quad k = 0,06, \quad \alpha = [0,0,1507].$$

После запуска вычислений получаем

$$D = [20,40], \quad H_T = [4,93,4,95], \quad h_c = [1,3,1,7], \quad n = [0,053,0,057], \quad k = 0,06, \quad \alpha = [0,0,1507],$$

$$X_{\max} = [106,834,159,522].$$

Стоит особо подчеркнуть, что моделирование может проводиться в интерактивном режиме — непосредственно на карте, так как многие величины в формулах являются как раз функциями географического положения. Так, отмечая на карте какое-либо место, тем самым мы получаем различные варианты параметров n и α , которые могут передаваться через базу топографических данных.

В. Заключение

Таким образом, приложения, создаваемые на платформе WebMap с применением метода недоопределенных моделей, не только обеспечивают пользователям доступ к картам, планам и связанной с ними информации в корпоративных сетях и через Интернет с помощью стандартных браузеров, но и заметно упрощают составление соответствующих интерактивных картографических моделей. Упрощение достигается, прежде всего, благодаря отсутствию необходимости разрабатывать алгоритм расчета, а также за счет возможности решать неоднозначные и многозначные задачи.

Обеспечиваются возможности расширенного описания используемой информации, в частности допускается интервальное представление неточно известных цифровых данных, получение расчетных оценок по неполной информации и др. Неполнота и неточность информации получает адекватное отражение в ширине расчетных интервалов.

Пользователи могут работать с усложненными (неполными, избыточными, неупорядоченными) системами линейных и нелинейных уравнений и неравенств, включая неявные зависимости, связывающие рассматриваемые переменные, причем можно непосредственно задавать желаемые значения любых моделируемых показателей, используя одни и те же показатели как в качестве входных (известных), так и выходных (прогнозируемых).

Литература

1. *Anderson G., Moreno-Sanchez R.* Building web-based spatial information solutions around open specifications and open source software // Trans. in GIS. — 2003. — V. 7, I. 4. — P. 447–466.
2. *Ехлаков Ю.П., Жуковский О.И., Рыбалов Н.Б.* Принципы построения web-ориентированной ГИС промышленного предприятия // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309, № 7. — С. 146–151.
3. *Нариньяни А.С.* Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. — 1997. — № 4.
4. *Нариньяни А.С., Телерман В.В., Ушаков Д.М., Швецов И.Е.* Программирование в ограничениях и недоопределенные модели // Информационные технологии. — 1998. — № 7. — С. 13–22.
5. *Pignatelli C., Sansò P., Mastronuzzi G.* Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence // Marine Geology. — 2009. — V. 260, I. 1–4. — P. 6–18.

Поступила в редакцию 06.07.2010.