

УДК 622:001.57:62-791.2

А.М. Мухаметшин, С.В. Поршнева

**МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Семинар № 3

В условиях постоянно возрастающих техногенных нагрузок на объекты социальной и промышленной инфраструктуры, приводящих к их непрогнозируемым разрушениям, сопровождающихся в целом ряде случаев человечески ми жертвами, возникает необходимость разработки систем мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Один из возможных подходов к решению данной проблемы состоит в использовании стационарных систем контроля состояния объектов социальной и промышленной инфраструктуры [1]. Принимая во внимание, что данные системы предназначены для непрерывного автоматизированного контроля и оперативного долгосрочного прогнозирования напряженно-деформированных состояний объектов исследования и динамических явлений, протекающих в грунтах и горных породах под ними (т.е. геоинформации), представляется естественным назвать данные системы геоинформационными измерительными системами (ГИИС).

Для решения задач мониторинга технического состояния объектов социальной и промышленной инфраструктуры ГИИС должны обеспечивать:

- сбор первичной информации о напряженно-деформированном состоянии объектов исследования, а также грунтов и/или горных пород под ними, с датчиков, обеспечивающих измерение различных физических параметров

(температуры, механических напряжений, сейсмических перемещений, вибрации, акустической эмиссии и т.д.) в большом числе измерительных точек;

- оперативную обработку и анализ первичной информации на основе развитых методов оптимальной аппроксимации, фильтрации, оценивания, сжатия данных и т.д. [2];

- накопление статистических данных о поведении объекта исследования и ведение оперативного и архивного банков данных;

- статистическую обработку информации на основе методов выявления скрытых закономерностей и статистических связей [3], факторного [4,5], регрессионного анализа и т.д.;

- управление режимом работы объектов исследования в текущих условиях эксплуатации;

- подготовку и отображение сводных данных о вероятностно-временных характеристиках поведения объекта исследования.

Принимая во внимание перечень решаемых задач, очевидно, что ГИИС должна включать в себя широкий спектр современных технических средств, построенных на базе вычислительной техники и информационно-телекоммуникационных технологий, развитую сеть первичных датчиков, обеспечивающих съем информации о многообразных сторонах поведения объекта исследования, сложное сис-

темное программное обеспечение, организующее взаимодействие устройств в системе, прикладные программы, реализующие соответствующие методы обработки и визуализации информации, а также непосредственное решение задачи контроля и прогноза. Отметим, что существенно стохастический характер исследуемых явлений, необходимость хранения, передачи и обработки больших массивов информации, специфические условия функционирования объектов исследования в значительной мере определяют принципы организации технических и программных средств ГИИС и применяемые в ней основные технические решения. При этом сложность организации ГИИС, многообразие выполняемых ею функций, стохастический характер функционирования объекта исследования, недостаточная определенность параметров и критериев функционирования, недостаточный опыт подобных систем с аналогичной областью применения в отечественной практике приводят к необходимости решения нетривиальных задач системного анализа на каждом этапе жизни ГИИС: проектирования, разработки, эксплуатации.

Здесь можно выделить следующие тесно взаимосвязанные классы задач:

1) Этап проектирования:

- определение и уточнение требований к ГИИС, которые формулируются на основе анализа состава и объема первичной информации, характеристик существующих и перспективных методов обработки информации, подходов к решению задач контроля и прогноза, помеховой обстановки в предполагаемых зонах организации каналов передачи данных, требуемых параметров времени реакции, помехоустойчивости, на-

дежности, живучести, а также описания эксплуатационных характеристик и сервисных служб;

- синтез структуры и архитектуры системы, удовлетворяющих предъявляемым требованиям;

- выбор состава технических средств;

- определение состава и структурной организации системного и прикладного программного обеспечения, баз и банков данных.

2) Этап разработки:

- определение технических решений и параметров, обеспечивающих обоснованный выбор вариантов построения ГИИС и ее компонентов;

- разработка оригинальных технических и программных средств;

- анализ и обработка данных макетных испытаний.

3) Этап эксплуатации:

- адаптация системы к реальным условиям функционирования и выбор оптимальных рабочих режимов;

- повышение помехозащищенности, структурной надежности и эксплуатационных характеристик системы.

Наиболее общим и универсальным методом решения перечисленных выше задач являются методы математического моделирования, которые можно раз делить на следующие 3 группы: аналитические, имитационные и комбинаторные.

В методах аналитического моделирования процесс функционирования ГИИС отображается средствами некоторого развитого математического аппарата (теории массового обслуживания, случайных процессов, графов, оптимального управления и т.д.) или их некоторой композиции. В рамках используемого аппарата вычисляются характеристики моделей, через которые определяются критерии функционирования ГИИС.

Например, базовая аналитическая модель ГИИС при использовании подходов теории массового обслуживания записывается в следующем виде [6]:

$$\Gamma = \langle L, K, H, \Pi, \kappa, W, T, s, D, \mu \rangle,$$

где L - число систем обслуживания c_l , $l = \overline{1, L}$ - порядок сети Γ ; K - число классов требований к сети; $H = (H_k)$, $k = \overline{1, K}$ - вектор начального числа требований в сети Γ ; H_k - начальное значение числа требований k -го класса в сети; Π - число уровней приоритета в сети; $\sigma = \{\sigma_\pi\}$, $\pi = \overline{1, \Pi}$ - разбиение множества класса требований $\{1, \dots, K\}$ по уровням приоритета; $W = (W_l)$, $l = \overline{1, L}$ - вектор типа функций распределения длительности обслуживания требований в сети Γ ; W_l - тип функции распределения длительности обслуживания требований в системе c_l ; $T = (v_{lk,mq})$, $l, m = \overline{1, L}$, $k, q = \overline{1, K}$ - матрица маршрутных вероятностей; $v_{lk,mq}$ - вероятность того, что требование k -го класса (d_k) после обслуживания в системе c_l попадает в систему c_m и меняет свой класс на q -й, $s_l = (s_l)$, $l = \overline{1, L}$ - вектор числа приборов в системах сети Γ ; s_l - число приборов в системе c_l ; $D = (D_l)$, $l = \overline{1, L}$ - вектор дисциплин обслуживания в системе c_l ; $\mu(n) = (\mu_{lk}(n_l))$, $l = \overline{1, L}$, $k = \overline{1, K}$ - матрица интенсивности обслуживания требований в системе c_l .

В качестве функции $\mu_{lk}(n_l)$ рассматривается $\mu_{lk}(n_l) = \alpha_l(v_l) \bar{\mu}_{lk}$ где $n_l = (n_{lk})$ - состояние системы c_l ; n_{lk} - число d_k в c_l ; $v_l = \sum_{k=1}^K n_{lk}$; $\bar{\mu}_{lk}$ -

удельная интенсивность обслуживания d_k в c_l (интенсивность обслуживания d_k в системе c_l при условии, что в системе c_l пребывает одно d_k); $\alpha_l(v_l)$ - коэффициент интенсивности обслуживания требований в системе c_l .

В методах имитационного моделирования в компьютере с помощью соответствующей программной модели имитируются некоторые возможные траектории функционирования системы на заданных интервалах наблюдения, параметры которых далее интерпретируются как критерии качества функционирования отображаемой данной моделью системы. Здесь в качестве одной из возможных концептуальных моделей ГИИС может быть использовано представление системы в виде конечного множества элементов, обменивающихся сообщениями по «идеальным» связям. При этом предполагается, что развивающийся в системе физический процесс является дискретным, рассматриваемый как некоторая последовательность событий на оси реального времени. В процессе функционирования дискретной системы элементы в соответствии с реализованными в них алгоритмами осуществляют формирование, передачу, прием, обработку, удаление информационных и управляющих сообщений различных типов, передаваемых по связям между элементами. В элементах определяются очереди сообщений и в соответствии с алгоритмами функционирования данных элементов правила установки сообщений в очередь и выбора сообщений из очередей.

Для описания понятий и структурных компонентов имитационных моделей можно использовать либо структурные диаграммы «сущность-связь» Чена или нотации Бэкуса-Науэра, в частности служебных символов: « ::= » - «это есть», « | » - логическое или, «

<...> » — угловые скобки для нетерминальных символов [7]. Здесь основными структурными компонентами базовой системы имитационного моделирования, используемыми для построения имитационных моделей ГИИС и организации компьютерных экспериментов с ними, являются элемент, связь, модель, сообщение:

< компонент > ::= <элемент> | <связь> | <сообщение> | <модель>;

< элемент > ::= <модуль> | <очередь> | <датчик> | <монитор>;

< связь > ::= <компонент, обеспечивающий обмен сообщениями между элементами и имеющий бесконечную пропускную способность>;

< сообщение > ::= <компонент, обеспечивающий моделирование информационных потоков и содержащий информацию о взаимодействии элементов модели^Λ

< модель > ::= <некоторая структура компонентов, в которых протекает общее модельное время>.

Модельное время отражает реальное время, протекающее в моделируемом объекте. Для моделирования траектории процесса функционирования объекта на некотором интервале модельного времени вводится понятие системного времени:

<системное время > ::= <машинное время, отображающее в модели модельное время>.

Поведение элемента описывается дискретной системой со счетным множеством состояний и с непрерывным временем.

Кроме того, в базовой системе имитационного моделирования используются следующие типы элементов: модули, очереди, датчики, мониторы.

< Модуль > ::= <элемент, процесс функционирования которого имеет относительно простое функциональное или алгоритмическое описание и

заключается в приеме, обработке и передаче сообщений>.

< Очередь > ::= <элемент, процесс функционирования которого заключается в приеме сообщений на хранение и выдаче сообщений после хранения>

< Датчик > ::= <элемент, процесс функционирования которого заключается в идентификации состояний элементов: модулей, очередей, мониторов>.

< Монитор > ::= <элемент, процесс функционирования которого заключается в обработке информации, поступающей от датчиков >.

Модули могут быть двух типов: процессами и случайными величинами.

< Процесс > ::= <модуль, обеспечивающий отображение алгоритмов обработки информационных потоков в модели>.

< Случайная величина > ::= <модуль, алгоритмом функционирования которого является формирование реализаций случайной величины с заданным законом распределения >.

Очереди могут быть двух типов: ординарными и агрегативными.

< Ординарная очередь > ::= <очередь, имеющая относительно простой алгоритм функционирования>

< Агрегативная очередь > ::= <очередь, которая является последовательностью очередей и имеет алгоритм функционирования, включающий в себя распределение поступающих требований по составляющим на данную очередь очередям>.

Датчики могут быть двух типов: датчиками системы элементов и датчиками требований.

< Датчик системы элементов > ::= < датчик системы элементов, регистрирующий формирование требований в модели> | < датчик системы элементов, регистрирующий удаление

требования из модели > | < датчик системы элементов, регистрирующий поступление требования из модели > | < датчик модуля, регистрирующий определенное агрегативное состояние модуля > | < датчик очереди, регистрирующий выход требования из очереди > | < датчик монитора, регистрирующий поступление обрабатываемых в мониторе сообщений типа сообщение в линии >.

< Датчик требований > ::= < датчик системы элементов, регистрирующий формирование требований в модели > | < датчик системы элементов, регистрирующий удаление требования из модели > | < датчик системы элементов, регистрирующий поступление требования из модели или выход требования из системы элементов > | < датчик очереди, регистрирующий поступление требования в очередь > | < датчик очереди, регистрирующий выход требования из очереди >.

Тип идентифицируемых датчиком состояний системы элементов определяется оператором датчика.

<Оператор датчика> ::= < некоторое агрегатное отношение связанной с датчиком системы элементов, индуцируемое датчиком на множество состояний данной системы элементов >.

Связи могут быть четырех типов: каналами, шинами, магистралями и линиями.

< Канал > ::= < связь, предназначенная для передачи сообщений из одного модуля в другой >.

< Шина > ::= < связь, предназначенная для передачи сообщений из одного модуля в очередь или из очереди в модуль >.

< Магистраль > ::= < связь, предназначенная для передачи сообщений в датчик из элементов: модуля, очереди, монитора >.

< Линия > ::= < связь, предназначенная для передачи сообщений из датчика в элементы: модуль, монитор >.

Также вводится понятие сети связей:

< Сеть связей > ::= < сеть каналов > | < сеть шин > | < сеть магистралей > | < сеть линий >.

< Сеть связей > ::= < граф, вершинами которого являются клеммы элементов, соответствующие данному типу связей (канал, шина, магистраль, линия), а ребрами - связи данного типа >.

В соответствии с типами связей сообщения также могут быть четырех типов: сообщения в каналах, сообщения в шинах, сообщения в магистралях и сообщения в линиях.

< Сообщение в канале > : ::= < сообщение, содержащее информацию о взаимодействии модулей > | < требование >.

< Сообщение в шине > ::= < сообщение, передаваемое из модуля в очередь на хранение или из очереди в модуль на обработку >.

< Сообщение в магистрали > ::= < сообщение, передаваемое в датчик и содержащее информацию о состояниях элементов: модуля, очереди, монитора >.

< Сообщение в линии > ::= < сообщение, формируемое датчиком и передаваемое на обработку в элементы: модуль, монитор >.

Модель включает в себя некоторую совокупность взаимодействующих компонентов.

< Состояние модели > ::= < композиция состояний составляющий данную модель компонентов >.

< Траектория модели > ::= < композиция графиков, входящих в состав модели элементов (график элемента - последовательность событий элементов, составленная в порядке возрастания времени наступления событий данных элементов) >.

В зависимости от конкретного содержания модели в множестве состояний

модели некоторые состояния должны рассматриваться как недопустимые.

С каждым датчиком связана определенная измеряемая функция, определяемая на множестве состояний системы элементов, за которой «следит» датчик. Совокупность измеряемых функций позволяет определять различные, измеряемые параметры модели: насыщенность очереди, траекторию требования, время пребывания требования в некотором семействе маршрутов и т.д. С каждым измеряемым параметром связана его база статистик, включающая в себя статистику, определение которых допускается для данного измеряемого параметра модели. Для реализации имитационных моделей ГИСС можно использовать, например, пакет GPSS Word [8].

В методах комбинированного моделирования для отображения про-

цесса функционирования ГИСС аналитические и информационные модели используются совместно, что, как правило, обеспечивает возможность построения эффективных в вычислительном отношении моделей.

Описанные в статье методы моделирования были использованы и доказали свою эффективность при проектировании ГИСС, используемой для непрерывного мониторинга технического состояния здания Екатеринбургского городского цирка (рис. 1), особенности эксплуатации которого обусловлены сложностью архитектуры здания, геологическим состоянием подстилающих пород, а также воздействием акустических колебаний, возбуждаемых наземным городским транспортом и поездами городского метрополитена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Геоинформационная система контроля состояния объектов социальной и промышленной инфраструктуры*/ Битюцкий В.П., Захарова Г.Б., Мухаметшин А.М., Параничев А.В., Поршнева С.В.// Вестник Томского государственного университета. Приложение, 2006. № 18. С. 174-178.

2. *Поршнева С.В., Овечкина Е.В., Каплан В.Е.* Теория и алгоритмы аппроксимации эмпирических зависимостей и распределений. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 212 с.; Анализ и выделение сейсмических сигналов. М.: Мир, 1986. 240 с.; Резников А.П. Обработка накопленной информации в затрудненных условиях. М.: Наука, 1976. 240 с.; Использование непрерывного вэйвлетпреобразования для обработки сейсмосигналов, излучаемых подземными взрывами/ Анисимов В.М. и др.// Горный информационно-аналитический бюллетень, 2006. № 7. С. 193-199 и др.

3. *Комбинированные методы определения вероятностных характеристик*. М.: Советское радио, 1973. 256 с.

4. *Налимов В.В.* Теория эксперимента. М. Наука, 1971. 208 с.

5. *Лоули Д., Максвелл А.* Факторный анализ как статистический метод. М.: Мир, 1967.

6. *Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F.G.* Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers. J. ACM. V. 22. № 2, 1975. P. 248-260.

7. *Автоматизированная система контроля горного давления. Методы и средства математического моделирования.* Часть 1. Препринт № 17. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1987. 39 с.

8. *Кудрявцев Е.М.* GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2004. 320 с. 

Коротко об авторах

Мухаметшин А.М., Поршнева С.В. – ИГД УрО РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкурятник*.