

## О системном подходе к задачам обработки наблюдений

Б.М. Пушной\*

**Аннотация.** С развитием компьютеризации и информатики понятие “обработка данных” стало всеобъемлющим. Первое время к обработке относили простые вычислительные операции вспомогательного характера, применение которых не требовало специального обоснования. Микроэлектроника создала условия широкого применения вычислительных методов. В большинстве систем наблюдения, предназначенных для научных исследований, четко просматривается разграничение между техническими средствами получения данных и последующей математической обработкой. Совмещение этих функций в единую систему позволяет существенно повысить эффективность наблюдения.

### 1. Некоторые особенности системного подхода

Представление о системе как о совокупности взаимодействующих элементов, наделенных определенными свойствами, предполагает наличие таких взаимодействий, которые обеспечивают системе относительную устойчивость в пространстве и времени. С этой позиции материальный мир рассматривается как иерархия взаимодействующих систем, а понятие хаоса переносится на внешние проявления недостаточно исследованных систем естественного происхождения. Люди начали создавать системы, как только возникла потребность в совместных действиях. Сейчас системами принято называть совокупность частей, достаточно разнородных по содержанию, но определенным образом связанных между собой. В середине прошлого века системы стали предметом самостоятельного исследования [1–3]. Побудительным мотивом послужила необходимость ускоренной разработки автоматизированных производств и сложных технических систем. Круг вопросов и идей общей теории систем сосредоточился на упорядочении представления о структуре, общих свойствах систем, о функциях элементов и связей между ними, о методах рационального проектирования и оптимизации. Представление о системе формулируется независимо от материальной реализации ее элементов и конкретизации целей. Это обосновано необходимостью расширения областей практического использования систем.

Сложность современных систем достигла такого уровня, когда полная совокупность происходящих в них процессов превышает естественные возможности чувственного и интеллектуального восприятия человека. Это обстоятельство заставило разделять систему на отдельные функциональные узлы, в которых значительная часть взаимодействий замыкается внутри узла и сравнительно

---

\*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

небольшое количество взаимодействий осуществляют связь между различными узлами.

Разделение системы на узлы с выделением небольшой части внешних связей означает введение схематического, модельного описания узла, содержащего функциональные зависимости между входными и выходными связями, которые данный узел обеспечивает или должен обеспечивать. Общей формой описания является математическая модель узла, в простых случаях описание ограничивается его “паспортными” характеристиками. Теоретическое обобщение накопленного опыта анализа и синтеза систем, столкнулось с методическими затруднениями. Описательный эмпирический характер в ряде мест привел к нагромождению определений, терминов, номенклатур и классификаций. Но это не помешало выделить ряд особенностей, присущих большим системам, и положить их в основу так называемого системного подхода к решению практических задач.

Общим свойством естественных и искусственно создаваемых систем является устойчивость. Взаимодействия и связи между элементами систем подразделяются на конструктивные, создающие и деструктивные, разрушающие. Они находятся в динамическом равновесии, но в устойчивых системах преобладают конструктивные связи. Искусственно создаваемые системы отличаются от природных наличием дополнительных элементов и связей, осуществляющих управление системой. Они обнаруживают и устраняют дестабилизирующие воздействия в месте их возникновения, создают такие взаимодействия, которые превращают неустойчивые процессы в устойчивые, воспринимают изменения условий работы всей системы и обеспечивают приспособление ее к новым условиям.

Многочисленные случайные деструктивные явления приводят к нежелательному изменению функций узлов системы. Возникает задача анализа этих изменений на уровне внешних связей узла и описания их “на языке модели”. В сущности, необходимо создать дополнительную модель узла, идентичную его реальному состоянию. Задача построения модели, описывающей реальное состояние наблюдаемого объекта, оформилась в теорию идентификации систем. При этом задача формирования управляющих воздействий решается на основе сопоставления параметров “реальной” и “идеальной” модели [4, 5]. В эту теорию вошли все принципиальные вопросы создания систем наблюдения. Важная особенность состоит в том, что к задаче идентификации предъявляются жесткие требования со стороны функциональных связей системы.

Узлы управления и процедуры идентификации распределены по всем уровням иерархической структуры больших систем. Поэтому в хорошо налаженных системах значительная часть операций обработки данных направлена на обеспечение устойчивости и приспособляемости. Образуется общий информационный каркас системы. Его сложность становится основным препятствием для введения сколько-нибудь принципиальных изменений в структуру систем. Консерватизм больших систем выражается в том, что допускается введение прогрессивных технологических решений в отдельные узлы, если это не требует реорганизации сложившейся структуры функциональных связей между узлами. Во многих случаях “поэлементная” компьютеризация систем не дает ожидаемого эффекта. К реорганизации больших систем может привести толь-

ко выдвижение дополнительных требований при постановке принципиально новых задач.

## 2. Некоторые возможности повышения эффективности систем наблюдения

Современные системы наблюдения отличаются от систем производственного назначения тем, что их целевая функция состоит в получении и обработке информации. Внутренний механизм функционирования систем наблюдения можно выразить в современной терминологии как декодирование сигналов, закодированных естественными системами, процессами, явлениями, событиями. Функция получения информации конкретизируется априорными данными о внешних проявлениях наблюдаемых систем, функция обработки определяется априорной моделью внутренних связей объектов наблюдения. В большинстве практических задач наблюдение производится с применением специально организуемых воздействий на исследуемый объект. Создаются системы наблюдения, когда необходимо проводить регулярные, “систематические” наблюдения. Тогда они становятся функциональным узлом системы научных исследований.

Все отмеченные выше свойства больших систем присущи системам наблюдения. Их развитие начиналось с применения в научных исследованиях измерительных инструментов. Образовалась простейшая структурная схема, состоящая из двух узлов – прибора и наблюдателя. К сожалению, эта схема сохранилась и в современных формулировках: приборная, измерительная, техническая часть системы служит для получения информации, а все остальное относится к обработке. Хотя в технической части также производится компьютерная обработка данных, ее в соответствии с таким консервативным разделением рассматривают как предварительную, первичную, поправочную. Технические специалисты, разрабатывающие и обслуживающие измерительный узел, ориентированы на поддержание его характеристик в пределах паспортных значений. Эти же паспортные данные рассматриваются при последующей обработке как характеристики точности измерений. В результате основная системная обработка измерений опирается только на математическую модель исследуемого объекта без учета реальной математической модели измерительного узла. В сущности такое разделение системы на узлы производится по профессиональному признаку и выражает традиционное соотношение между теорией и практикой.

В последнее время наметилась тенденция рассматривать комплексную математическую модель системы наблюдения, которая позволяет согласовать функцию приборной части с общей задачей наблюдения и исследования. Ниже приведено краткое описание двух конкретных систем различного назначения, в которых использован этот подход. В обоих примерах используется характерная особенность использования моделей объекта в системах наблюдения. Если система имеет “хорошую” модель объекта, пользователь интересуется не всеми параметрами модели, а сравнительно небольшим числом наиболее важных. Можно “нацелить” приборную часть на измерение этих наиболее информативных параметров.

### **3. Система дальнего обнаружения астероидов, сближающихся с Землей**

Падение Тунгусского метеорита в 1908 г. активизировало поиск следов аналогичных катастроф в прошлом и привело к осознанию необходимости предотвращения таких катастроф в будущем. В восьмидесятые годы прошлого века началось подробное обсуждение на международных конференциях практических задач по созданию системы противодействия космогенным катастрофам с использованием существующих систем противоракетной обороны в качестве основного “системосоздающего” узла. Возможность практической реализации системы сомнений не вызывала и обсуждение проблемы рассредоточилось по ее многочисленным функциональным узлам. Рассматривались различные способы активного воздействия на опасные небесные тела и наиболее экономичные варианты траекторий доставки к ним средств воздействия. Почти во всех элементах системы встретились задачи, требующие дополнительной проработки и сбора экспериментальных данных.

Важное значение имела также оценка реальной опасности катастроф для определения практической и экономической эффективности системы защиты. По масштабам возможных последствий космогенные катастрофы стоят на первом месте, но по вероятности их возникновения – на последнем. Тела диаметром менее 10 м тормозятся атмосферой. Диаметр Тунгусского метеорита оценивается в 70 м. Вероятностные оценки астероидной опасности получены на основе известной регрессионной связи между диаметром и количеством небесных тел, образовавшихся в результате столкновительной эволюции. Общее количество малых тел в Солнечной системе по этим оценкам может достигать до миллиона. Открыто и “пронумеровано” в каталогах несколько тысяч астероидов диаметром более 200 м. Примерно 300 из них могут регулярно сближаться с Землей, но по расчетам ни один не приблизится до опасного расстояния в новом тысячелетии. Вероятностная модель дает оценку среднего интервала между падениями малых небесных тел в 100 лет.

Для системы защиты вероятностное описание опасности неприемлемо. Система наблюдения должна свести задачу прогноза к детерминированному описанию движения конкретного объекта. Случайными должны оставаться только высокая достоверность раннего обнаружения и малые погрешности измеренных параметров движения. Существующие системы наблюдения способны обнаруживать малые тела только на близком расстоянии и действительно обнаруживают их в среднем 10 в год [6]. Оказалось, что наиболее опасная часть астероидного “населения” Солнечной системы недоступна для современных систем наблюдения.

Такое положение сложилось по следующим причинам. Регистрация особо малых астероидов не могла внести принципиальных дополнений в общую модель Солнечной системы. Малые тела отражают недостаточно света для достоверной регистрации. Столкновения небесных тел относятся к достаточно редким деструктивным событиям. Определенную роль сыграла отмеченная выше консервативность систем.

Несмотря на то, что системы наблюдения астероидов прошли несколько этапов “поэлементной” модернизации, которая завершилась полной компьюте-

ризацией обработки и применением светоприемных матриц с зарядовой связью, их принцип действия не изменился. Отличительным информативным признаком астероида на фоне звездного неба является его движение. Движущийся астероид оставляет на матричном фотоприемнике след в форме штриха, многочисленные звезды формируют точечные изображения. Слабый световой поток от астероида фокусируется телескопом в конечного размера пятно, которое через несколько минут перемещается на соседний участок матричного фотоприемника. В практике астрономических наблюдений экспонирование продолжается более 3 ч. Если бы астероид диаметром в 50 м был неподвижен, его можно было бы обнаружить непосредственно в поясе астероидов. Движение, являясь наиболее информативным признаком астероида, препятствует эффективному экспонированию и ограничивает возможности обнаружения.

Почти все известные системы наблюдения пространственно-временных процессов воспринимают их как последовательность состояний. Радикальное решение проблемы – переход от многократной регистрации положений непосредственно к регистрации движений [7–9]. С системной точки зрения постановка задачи сводится к совмещению процесса сканирования цифрового изображения звездного неба с вычислением орбитальных параметров обнаруживаемого объекта в единый алгоритм. Это достигается предварительным вычислением семейства модельных “гипотетических” орбит, проходящих по относительно узкому полю зрения телескопа в данном сеансе наблюдения и приводящих тела к сближению с Землей при их дальнейшем движении. Так как фотоприемная матрица имеет дискретную структуру, семейство орбит образует ограниченное счетное множество. Введенные ограничения сокращают число независимых параметров (степеней свободы) гипотетических орбит с шести до четырех. В компьютере организуется четырехмерный массив, в котором адресами элементов являются дискретные значения параметров гипотетических орбит. Он представляет собой пространство параметров движений, подлежащих обнаружению. В этом пространстве опасные астероиды представляются неподвижными, и адрес элемента с наибольшей суммой накопленного заряда дает первое приближение параметров орбиты обнаруженного малого астероида и момента ожидаемого сближения.

Данная система наблюдения отличается некоторыми особенностями. Она допускает длительное прерывание экспонирования с последующим его продолжением и суммирование данных, получаемых различными телескопами в общем пространстве параметров. В ней реальное “физическое” время является “внутрисистемным” технологическим параметром, а момент и параметры прогнозируемого сближения извлекаются из моделей орбитального движения астероида и Земли. В этой системе обработка не преобразует данные к форме, удобной для введения в математическую модель, а преобразует модель к форме, соответствующей особенностям регистрируемых данных.

#### 4. Фазовый метод сейсмического зондирования

Можно привести еще один пример системы наблюдения, в которой обработка данных играет роль системосоздающего узла. Она также предназначена для исследования аномальных состояний, в данном случае – для прогноза земле-

трясений. Известно более ста косвенных предвестников землетрясения, доступных для регистрации на земной поверхности, но из-за сложности и разнообразия причинно-следственных связей ни один из них не обеспечивает приемлемой достоверности прогноза. Из всех косвенных методов получения информации о состоянии очага землетрясения самый прямой – зондирование его искусственно возбуждаемыми сейсмическими волнами. Современные системы сейсмического зондирования позволяют определять координаты локальных неоднородностей на значительной глубине, но измерять вариации их состояния они не могут, не хватая точности.

В ходе “поэментного” совершенствования для излучения сейсмических волн стали применяться вибраторы. Вибрационные источники волн отличаются от традиционных взрывных высокой стабильностью, точностью и повторяемостью, которая обеспечивается специальной системой управления и программируемым синтезатором частот. Вибрационная технология представляет характерную особенность исследуемой среды в спектральной форме. Техническая точность вибрационной аппаратуры достаточна для уверенной регистрации процессов накопления упругих деформаций в потенциальных очагах землетрясений. Методы обработки данных сейсмического зондирования развивались применительно к сигналам импульсного возбуждения. Отклик среды на импульсное воздействие (сейсмограмма) представляет собой интерференционную картину, отражающую процессы рефракции, преломления и отражения волн, прошедших по сложной среде различными путями и с различными задержками распространения. Цель обработки – определение на сейсмограмме численных значений моментов прихода волн с последующим вычислением координат отражающих неоднородностей среды. Система обработки достаточно сложна и не обходится без визуальной интерпретации.

Только консервативностью системы обработки объясняется ставшее традицией предварительное преобразование данных вибрационного зондирования из спектральной формы в импульсную. При таком подходе высокая точность возбуждения вибрационных волн теряется в процессе обработки. Ставится задача увеличить точность результатов вибрационного зондирования до уровня точности технических узлов системы.

Измерение разности фаз двух синусоидальных сигналов с заданной частотой выражает их взаимный сдвиг во времени неоднозначно, в виде дробной части периода. Однозначное значение сдвига равно сумме целого числа периодов и измеренной дробной части. Неизвестное число периодов можно вычислить, используя дополнительный сигнал с другим значением частоты. Этот принцип используется в известных радиотехнических навигационных системах с элементами космического базирования [10].

Вибрационный сигнал с постоянной частотой 5 Гц можно зарегистрировать на расстоянии в 300 км и измерить его амплитуду с погрешностью в 1% и фазу с погрешностью в пределах  $1^\circ$ . Это соответствует интервалу времени 0.55 мс. За это время сейсмическая волна проходит 3 м. Многократное повторение зондирования в таком режиме позволило обнаружить вариации параметров сигнала, соответствующие периодичности приливных деформаций литосферы. Измеряемый вектор образован суммой волн, прошедших по сложной среде с различными задержками. Задача обработки состоит в разделении зарегистрированного

вектора на компоненты, соответствующие различным волнам, в распространении принципа фазовой навигации на случай сложной сейсмической среды. Она сводится к формальной процедуре – решению системы нелинейных уравнений [11]. Такая обработка практически не вносит дополнительной методической погрешности.

В этом методе ограниченное количество точно измеренных параметров, полученных при зондировании среды на различных частотах, непосредственно вводится в математическую модель импульсной сейсмограммы. Этот метод принципиально отличается от обычного. Его можно рассматривать как восстановление предельно вырожденного варианта голограммы, в которой вместо изображения содержится ограниченный “список” параметров. Продолжительное излучаемый гармонический сигнал формирует в сложной среде поле фаз и амплитуд. Сканирование этого поля достигается его смещением относительно неподвижного сейсмоприемника при изменении частоты сигнала. Здесь, как и в системе астрономического назначения, не требуется диалог с пользователем. Полностью формализованная обработка допускает “сквозную” оптимизацию системы.

## 5. О компьютерной поддержке диалогового режима обработки данных

Системы научного исследования ориентированы на обнаружение и модельное описание аномалий. Они проявляются как невязки между данными и моделью. Задачи расширения модели описанием невязок часто оказываются неформальными. Пример такой задачи – анализ спектрозональных снимков земной поверхности с целью исследования природных ресурсов, скрытых под относительно тонким слоем ландшафтных форм и их сочетаний, имеющих суточную, погодную и сезонную ритмику [12]. В этом случае пользователь становится элементом диалогового узла системы, и в соответствии с системными принципами его функция подлежит идентификации. Внешний вид этой функции прост. Применяя программы преобразования и суммирования спектрозональных изображений местности, зарегистрированных различных условиях, оператор получает изображение, на котором достаточно отчетливо прослеживаются интересующие его особенности “подстилающей поверхности”.

Полученная оператором последовательность преобразований полностью описывается математическими понятиями. В данном примере диалоговый режим обработки осложняется преодолением “языкового барьера” между геоморфологией и вычислительной математикой. Разные операторы, работая на различном оборудовании, методом проб и ошибок получают совпадающие результаты, хотя организованные ими программные построения существенно различаются. Если разные методы решения неформальной задачи дают близкие результаты, в разных методах и подходах можно найти нечто общее. В задачу идентификации входит отслеживание процесса поиска оператором эффективных программных конструкций и создание на этой основе словаря и языка программирования, ориентированного на компьютерную поддержку диалога с пользователем при решении задач данного класса. Современная компьютерная технология позволяет представлять программные конструкции в форме макросов. Остается формализовать процесс наполнения макросов полезным содержанием.

## Выводы

В системах наблюдения, предназначенных для научных исследований, четко просматривается разделение функций получения и обработки данных. Получение данных группируется вокруг аппаратной части системы и задачи измерения. Функция обработки сводится к анализу полученных данных и их преобразованию к форме, допускающей их введение в имитационную математическую модель наблюдаемого объекта. Развитие математических моделей направлено на более подробное и точное описание наиболее существенных особенностей объекта. Развитие техники измерений направлено на более подробную, детальную и расширенную регистрацию внешних проявлений объекта. Это сильно усложняет задачи и процессы обработки данных в системах наблюдения.

Распространение функций обработки данных на измерительную часть приводит к построению общего алгоритма функционирования системы наблюдения и существенному повышению ее эффективности. При этом создаются условия целенаправленного получения измерительной аппаратурой полезной для модели информации. Сущность такого подхода состоит в “продолжении” математической модели исследуемого объекта до описания сигнала, который нужно “извлечь” из физических проявлений объекта или зондирующего сигнала, который вызывает в объекте нужную реакцию. Сквозная алгоритмизация систем наблюдения приводит к отказу от диалоговой поддержки обработки данных и позволяет оптимизировать систему в целом.

Во многих задачах наблюдения нельзя обойтись без диалогового режима. Как правило, в этих задачах работа оператора отличается особой сложностью. Полезно в таких случаях развивать идентификацию оператора с целью поиска и модельного описания его результативных действий.

## Список литературы

- [1] Садовский В.Н. Основания общей теории систем. – М.: Наука, 1974.
- [2] Гладких Б.А., Люханов В.М., Перегудов Ф.И. и др. Основы системного подхода и их приложение к разработке территориальных автоматизированных систем управления. – Томск: Изд. Томского ун-та, 1976.
- [3] Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981.
- [4] Zadeh L.A. From Circuit Theory to System Theory // Proc. IRE. – 1962. – Vol. 50. – P. 856–865.
- [5] Современные методы идентификации систем / Под ред. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983.
- [6] Gehrels T., Scanning with Charge-coupled Devices // Space Sciens Reviews. – 1991. – Vol. 58. – P. 347–385.
- [7] Алексеев А.С., Пушной Б.М. Об одном методе дальнего прогноза сближений малых небесных тел с Землей // Тр. Всесоюз. совещ. “Астероидная опасность”. – С.-Петербург: Изд. Ин-та теоретической астрономии РАН, 1992. – 205 с.
- [8] Алексеев А.С., Пушной Б.М., Кайсина Н.В. О методе дальнего прогноза сближений малых небесных тел с Землей // *Астрономический вестник*. – 1994. – Т. 28, № 4–5. – С. 223–231.



- [9] Алексеев А.С., Пушной Б.М., Кайсина Н.В. Алгоритм сканирования эфемерид в системе дальнего обнаружения малых небесных тел // Изв. Челябинского научного центра. Тр. Междунар. науч. конф. "Космическая защита Земли". – Снежинск, 1997. – Ч. 1. – С. 253–256.
- [10] Пушной Б.М., К теории измерительных систем с периодическими функциями преобразования // Автометрия. – 1972. – № 4. – С. 83–88.
- [11] Pushnoy B.M. On a phase method of vibroseismic exploration // Bull. NCC. Ser. Math. Model. in Geophys. – Novosibirsk: NCC Publisher, 2003. – Iss. 8. – P. 99–108.
- [12] Пушной Б.М. Об организации диалогового режима в тематической обработке аэрокосмических изображений // Космические методы изучения природной среды Сибири и Дальнего востока. – Новосибирск: Наука, 1983.