УДК 681.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Ординарцева Наталья Павловна, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и метрология»
Пензенский государственный университет
Ordinartseva Natalia, PhD, Penza State University, np_ordinartseva@mail.ru

Рассмотрены специфические особенности моделирования и, собственно, моделей в предметной области измерений, подчеркнута значимость моделирования в этой области; последнее следует учитывать при построении базы знаний интеллектуальных измерительных систем.

Ключевые слова: *Модель, измерительная задача, данные нечисловой природы, погрешность, неопределенность.*

Изучение любого объекта (явления, процесса) общепринято начинать с построения модели. Каждая предметная область обладает специфическими особенностями, что отражается в ее моделях. Так, само понятие измеряемой величины вводится на определенной модели объекта измерения, которая строится для решения конкретной практической задачи и отражает существенные для ее решения особенности объекта при некоторой идеализации его свойств [1]. Разнообразие задач и объектов измерений обусловили множество используемых моделей.

В предметной области измерений моделируется следующее многообразие объектов и процедур [1]:

– входные воздействия;
– измеряемые величины;
– средства измерений;
– процедуры измерений;
– характеристики результатов измерений;
– погрешности / неопределенности измерений;
– процедуры анализа (метрологический анализ);
– процедуры синтеза (проектирование измерительных модулей).

В целом аппарат описания математических моделей объектов, условий, процедур и средств измерений развивается по следующей схеме:

процедура измерений (уравнение измерений) $\rightarrow$ *объект измерений (входное воздействие)* $\rightarrow$ *средство измерений (модуль)* $\rightarrow$ *условия измерений (набор дополнительных входных воздействий).*

Результатам измерений присущи те же свойства, что и объектам измерений, а не свойства действительных чисел как таковых, как часто принято считать. Результаты измерений являются данными нечисловой природы и лежат в пространствах, не имеющих векторной структуры. Методы обработки нечисловых данных основаны на принципиально ином математическом аппарате – на применении различных расстояний в пространствах объектов нечисловой природы. Различная мощность нечисловых множеств измеряемых свойств и числовых множеств отображений результатов измерений (заметим, даже гомоморфных отображений) обусловила погрешность / неопределенность последних [2].

Наиболее общее формальное определение понятия измерительной процедуры (модель измерительной процедуры) впервые было дано А. Тарским [3]: *«измерение – гомоморфное отображение некоторой эмпирической системы с отношениями ξ на числовую систему с отношениями N, т.е.*

$\xi = [\xi, R_\xi] \rightarrow N = [N, R_N]$,

где $\xi = [\xi, R_\xi]$ *– эмпирическая система с отношениями (ξ – множество эмпирических объектов; R_ξ – множество эмпирических отношений);* $N = [N, R_N]$ *– числовая система отношений (N – множество числовых объектов; R_N – множество отношений)».*

И. Пфанцагль [4, с. 18; с. 24] вводит понятия и условия гомоморфизма (однонаправленности) и изоморфизма (двунаправленности) при отображении эмпирических систем с отношениями в числовые системы с отношениями. И даже условиями гомоморфизма отображение $[\xi, R_\xi] \rightarrow [N, R_N]$ не определяется единственным образом: в зависимости от принятой концепции для оценки качества результата измерения используют концептуальную модель погрешности (связанную с результатом измерения, т.е. с отсчетом на шкале средства измерения плюс-минус погрешность) или концептуальную модель неопределенности измерений (связанную с самим объектом измерения: результат измерения, принадлежащий интервалу охвата) [2].

Измерительная процедура имеет следующие отличительные особенности, которые следует учесть при моделировании предметной области измерений:

– получение результатов измерений как данных нечисловой природы с интервальной неопределенностью без вероятностной меры;

– некорректность, обратность, плохая обусловленность измерительных задач;

– высоковероятностная неполнота получаемых данных измерительного эксперимента (пропущенные, неполные, цензурированные данные).

Рассмотрим перечисленные особенности.

Результат измерения физической величины, несущей в себе свойства единицы соответствующего рода величины, представляет собой отображение реального физического свойства X на числовую ось Y. В большинстве работ, затрагивающих проблемы построения аксиоматических основ теории измерений, то обстоятельство, что результаты измерений представляются действительными числами, служит основанием для приписывания этим результатам свойств действительных чисел. Но результат измерений представляет собой величину как результат преобразования формы представления информации из аналоговой в числовую. Из последнего следует, что результатам измерений присущи те же свойства, что и объектам измерений (физическим величинам) – результаты измерений являются данными <u>нечисловой природы</u>. И если обратиться к математическому аспекту моделирования данных нечисловой природы, надо отметить следующее. В классической математической статистике элементы выборки – это числа, в многомерном статистическом анализе – векторы, а объекты нечисловой природы лежат в пространствах, не имеющих векторной структуры. В этих пространствах может не оказаться операции сложения – и измеряемая величина будет неаддитивной. Примером неаддитивной величины может служить температура $T_{1,2}$ соприкасающихся тел с начальными температурами T_1 и T_2. Более того, одна и та же величина (например, электрическое сопротивление) может быть как аддитивной, так и неаддитивной в зависимости от схемы включения (при последовательном / параллельном включении проводников).

Неизбежное присутствие погрешностей трактует результат измерения как ограниченный интервал ее неопределенности, при этом неизвестное истинное значение измеренной величины (единственное в концепции погрешности и множество истинных в концепции неопределенности [2]) лежит внутри интервала и все значения внутри интервала считаются равновозможными (но не равновероятными): нельзя сделать никакого предположения о вероятностном законе равновозможных значений; понятие равной возможности не следует трактовать как равномерное распределение, так как операции с равномерно распределенными величинами приводят к изменению распределения результата (сумма равномерных распределений стремится к нормальному распределению). Таким образом, <u>результаты измерений есть данные нечисловой природы с интервальной неопределенностью без вероятностной меры.</u>

Задача восстановления функциональной зависимости $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$, связывающей ожидаемую величину отклика Y (результат измерения, считываемый со шкалы средства измерения) с объясняющими переменными $X_1, X_2, \dots, X_n$ (самой измеряемой величиной), является регрессионной задачей. С математической точки зрения любая регрессионная задача является некорректной, обратной и плохо обусловленной задачей. <u>Некорректность</u> регрессионной задачи проявляется в том, что восстановление искомой зависимости порождения данных (однозначного нахождения истинного значения измеряемой величины) не имеет единственного решения. По сути эти задачи принадлежат к классу некорректно поставленных задач. Если исходные данные известны приближенно (результаты измерений содержат случайные погрешности / неопределенности), то упомянутая неустойчивость приводит к практической неединственности решения в рамках заданной точности. Нельзя иметь точное решение уравнения с приближенно известной правой частью $\Delta X \leftrightarrow \Delta Y$. В этом случае погрешности / неопределенности измерения рассматриваются как входные величины в модельной функции, и погрешности / неопределенности их оценок входят в неопределенность оценки выходной величины. А то обстоятельство, что в задаче измерений экспериментальные точки определяют саму искомую эмпирическую зависимость, позволяет говорить об этой задаче как об обратно поставленной. Принципиально отметить то обстоятельство, что в ходе измерительного (регрессионного) эксперимента экспериментатор, снимая показания с измерительного прибора, может иметь лишь статистику $\varphi(Y)$, но не $f(X)$. При корректном моделировании поставленной измерительной задачи необходимо отразить различие между $\varphi(Y)$ и $f(X)$.

Кроме того, задачи регрессионного анализа, предполагающие восстановление / аппроксимацию зависимостей порождения данных, в силу неудачной традиции о нормальности распределения лежащих в ее основе случайных величин (не встречающихся в реальной практике, – а это не вполне адекватность постановки задачи), являются плохо обусловленными задачами.

К качественным чертам измерительных задач, которые также следует учитывать для целей формализации и математического моделирования, относятся непрерывность и достаточная «гладкость»; эти качества предполагаются в задачах метрологической и измерительной практики.

С проблемой пропуска в данных сталкиваются при градуировке измерительных приборов; поверка средств измерений представляют собой измерительные эксперименты при неслучайных пропусках (здесь имеют место пропуски данных вне оцифрованных точек шкалы). Аналогично при аналого-цифровом преобразовании измерительного сигнала имеют место неслучайные пропуски информации о непрерывном изменении свойств объекта измерения, обуславливающие возникновение погрешности дискретизации и квантования.

Эксперименты, в которых отсутствуют данные из-за окончания ранее регламентированного срока вследствие выхода из строя технического устройства (перегорание схемы, метрологический отказ), представляют собой эксперименты с цензурированными данными. Пропущенными данными в статистике эксперимента могут быть отсутствующие данные в наиболее сложно реализуемых точках пространства влияющих факторов и т.д. Информацию о пропусках следует учитывать, чтобы избежать смещений в оценках процесса. Удобно представить s-мерное наблюдение с пропусками в виде пары (X, M), где X – исходный s-мерный вектор значений переменных, а M – s-мерный вектор пропусков, координаты которого имеют значения «пропуск» либо «нет пропуска», отвечая присутствию или отсутствию соответствующей переменной. Например, для случая дискретизации непрерывной во времени величины, когда каждое значение дискретизированной величины строго «привязано» к моменту дискретизации $t_{\text{диск}}$, вектор пропусков M равен

$$M(t) = \begin{cases} 1\left(t \neq t_{\text{диск}}\right) - \text{пропуск} \\ 0\left(t = t_{\text{диск}}\right) - \text{нет пропуска} \end{cases}$$

Случайный вектор $(X,\ M)$ имеет распределение $p^{X,M}$. Для получения более достоверной информации об исследуемом объекте механизмом пропусков в общем случае нельзя пренебречь. Однако в сложившейся практике решения регрессионных задач эксперимент $p^{X,M}$подменяют его проекцией p^X (опуская информацию о пропусках), тем самым не всегда корректно упрощая решаемую задачу и восстанавливая искомую зависимость по одной лишь проекции.

Развитие средств измерений по пути компьютеризации и интеллектуализации потребовало исчерпывающей формализации описания объектов, условий, процедур и средств измерений. Говоря о значимости формализации в измерениях, следует отметить моделирование как отправную точку техники виртуальных измерений и создания виртуальных средств измерений.

Исчерпывающей формализацией измерительных данных и измерительных знаний (алгоритмов принятия решений) отличаются интеллектуальные измерительные и адаптивные (как разновидности интеллектуальных) системы. Интеллектуальная обработка данных с интеллектуальных датчиков требует оценивания параметров объекта посредством алгоритмов базы знаний и выбора одной из возможных гипотез о поведении модели.

Вопросы идентификации – это также вопросы нахождения соответствующей модели среди их описательного множества по результатам измерительного эксперимента; адекватность модели в поставленной задаче проверяется ее достоверностью.

В адаптивных измерительных системах требуется формализация поведенческого механизма, обеспечивающего возвратные действия системы и устойчивость выполнения общесистемной целевой функции на основе принципа равновесия системы в конкретных условиях измерения. Последнее обстоятельство требует адаптации структуры системы под выполняемый измерительный процесс, возможность синтеза новых задач (иногда вспомогательных) по результатам функционирования измерительной системы; задачи эволюционного типа требуют привлечения нестандартного математического аппарата нечеткой логики.

Список использованных источников

1. Ординарцева, Н. П. Математическая модель измерительной задачи / Н. П. Ординарцева // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – 2012. – № 5 (130). – С. 90–94.

2. Ординарцева, Н. П. Погрешность неопределенности или неопределенность погрешности / Н. П. Ординарцева // Законодательная и прикладная метрология. – 2012. – № 6. – С. 41–44.

3. Tarski, A. Contributions to the theory of models / A. Tarski // I-III Indagationes Math. – 1954. – P. 16.

4. Пфанцагль, И. Теория измерений / И. Пфанцагль. – М.: Мир, 1976. – 248 с. // Johann Pfanzagl. Theory of measurement. – Physica-Verlag. Würzburg-Wien, 1971.

5. Ординарцева, Н. П. Планирование эксперимента в измерениях / Н. П. Ординарцева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 78, № 3. – С. 72–76 [Ordinartseva, N. P. Design of the Experiments in Measurements / N. P. Ordinartseva // INORGANIC MATERIALS. English translation of selected articles from Zavodskay Laboratoriay. Diagnostika Materialov. – New York : Springer, 2013. – Vol. 79, Iss. 3. – P. 72–76 (RSCI)].