

Раздел III. Моделирование сложных систем

УДК 519.7

Б.В. Мамутов

СТОХАСТИЧЕСКИЕ РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предложена обобщенная последовательность этапов решения задач экологического мониторинга. Рассмотрена модель, позволяющая исследовать стохастическую регрессию одного случайного фактора на другом случайном факторе экологического объекта. Результаты стохастической регрессионной модели могут рассматриваться, как элементы базовых множеств для задания функций принадлежности нечетких переменных из терм-множеств лингвистических переменных.

Экологический мониторинг; стохастическая модель.

B.V. Mamutov

STOCHASTIC REGRESSION MODELS OF ECOLOGICAL OBJECTS

The generalised sequence of stages of the decision of problems of ecological monitoring is offered. The model is considered, allowing to investigate stochastic regress of one random factor on other random factor of ecological object. The results of the stochastic regression model can be considered as elements of the base sets for the job functions of fuzzy variables in the term sets of linguistic variables.

Ecological monitoring; stochastic model.

Современные энергетические предприятия остаются источниками генерации загрязняющих веществ в окружающую среду, несмотря на постоянное совершенствование применяемых технологий при производстве энергии и тепла. В связи с этим остается актуальной задача экологического мониторинга состояния среды, в которой находятся энергетические предприятия, а также разработки моделей экологических объектов с целью прогноза динамических изменений состояний среды.

Предлагается следующая обобщенная последовательность этапов решения задач экологического мониторинга, показанная на рис. 1.

В качестве аналога для данной последовательности взята последовательность решения задач экологического мониторинга в зоне влияния объектов хранения и уничтожения химического оружия, рассмотренная в работе [1].

Применение математических моделей для исследования состояний экологических объектов происходит на 3–6 этапах решения задач экологического мониторинга. Оценка полученных результатов наблюдений на соответствие критериям контроля требует проверки точности и достоверности экологической информации, гарантии своевременности доставки информации. Обработка информации для получения картины загрязнения в большей степени связана с представлением данных в требуемой форме.

Обработка информации для получения прогноза и оценок экологического состояния среды, а также выдача информации об экологическом состоянии – это разработка и применение моделей аналитического вида (например, уравнения в

пространстве состояний), стохастических моделей, моделей, полученных в результате активизации использования интуиции и опыта специалистов (модели принятия решений с обработкой экспертных знаний).

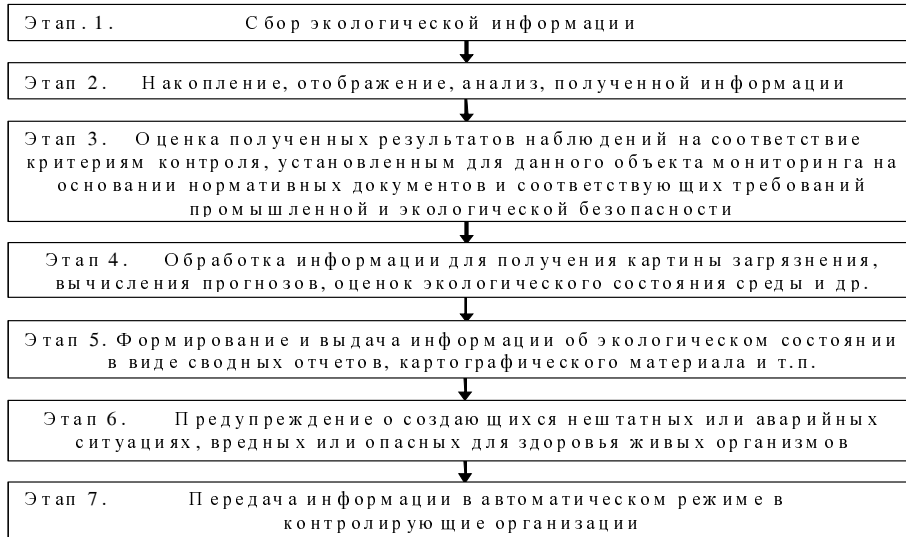


Рис. 1. Этапы решения задач экологического мониторинга

Таким образом, следует сделать вывод, что спектр возможных для применения методов моделирования экологических объектов достаточно широк, как это показано на рис. 2.

Аналитические методы	Статистические методы	Теоретико-множественные модели	Модели математической логики	Модели экспертных знаний	Модели в виде сценариев	Мозговая атака
----------------------	-----------------------	--------------------------------	------------------------------	-------	--------------------------	-------------------------	----------------

Рис. 2. Спектр методов моделирования экосистем

Расположение методов на рис. 2 слева направо выполнено в соответствии с ростом сложности формализации. По мере роста степени неопределенности относительно моделей объектов экосистем увеличивается потребность в применении вербального описания параметров в формальном описании, в применении знаний экспертов. Если степень неопределенности низка, то формальная модель имеет вид формулы, реализующей в математическом виде фундаментальный закон [2]. При решении задач моделирования могут применяться одновременно методы формализованного представления систем и методы, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов.

Предприятия энергетической промышленности имеют в своем составе химические цеха, в задачу которых входит подготовка питательной воды для котлов и поддержание водно-химического режима при производстве энергии и тепла.

Образующиеся сточные воды предприятий энергетической промышленности содержат токсичные вещества и поступают после локальных очистных сооружений либо на городские станции аэрации, либо в реку.

Стоки станций являются источником загрязнения поверхностных вод. Существует опасность загрязнения речных вод из-за аварий на станциях и предприятиях. Загрязнение воды реки также может произойти из-за недостаточно засоренной ливневой канализации. Концентрация загрязняющих веществ и расходы воды на ливневых водосливах зависят от многих факторов.

При построении полютографов для каждого водосборного участка городской территории требуется информация об объемах воды и концентрации загрязняющих веществ. На данных анализа полютографов осуществляется количественная оценка поступающей в водный объект массы загрязняющих веществ.

При сборе информации [3] необходимо оценить максимальные расходы воды с городских территорий и максимальные количества загрязняющих веществ, поступающих в водные объекты с этим стоком за один дождь. Необходима информация о площади выпадения дождя над городом. Для расчета величины поверхностного стока применяют ландшафтно-гидрологический подход [4]. Модель поверхностного стока:

$$S=H(K_1F_1+K_2F_2+K_3F_3), (\text{м}^3) \quad (1)$$

где H – уровень осадков (м);

F_1, F_2, F_3 – площади асфальтовых покрытий, крыш, парков (газонов) (м^2);

K_1, K_2, K_3 – коэффициенты стока: для асфальта – 0,7, для крыш – 0,75–0,95, для парков и газонов – до 0,2.

Основой модели для оценки экологических последствий аварийных и ливневых сбросов является система дифференциальных уравнений динамики и массопереноса. Для описания динамики переноса использовалась система уравнений «мелкой воды», записанная в интегральной форме. Уравнение массопереноса после дискретизации решается модифицированным методом продольно-поперечной прогонки [5].

Существуют более сложные математические модели для изучения процессов формирования устойчивых пространственно-временных структур – основных объектов исследования биофизики и теоретической биологии. Поступление потока энергии извне в экологическую систему и наличие внешних условий вызывает нелинейные динамические взаимодействия внутри системы, что приводит к возникновению из хаотических состояний высокоупорядоченных пространственных, временных или пространственно-временных структур (диссипативных структур [6]). Научные исследования количественного описания процессов развития и самоорганизации систем названо синергетикой (наука о явлениях кооперативности) [7].

В математические модели закладываются биологические представления, гипотезы о кинетических свойствах процессов. Подобные модели позволяют изучить качественно и количественно пространственно-временную структуру, формирующуюся в системе, вскрыть причинно-следственные связи и исследовать процессы образования структур на двух уровнях организации – биохимическом и экологическом (популяционном, биоценотическом) [8].

Отметим также, что применение моделей, основанных на фундаментальных естественно-физических законах, ограничивается наличием случайных трудноформализуемых факторов реальных экологических объектов, сложностью формализации многопараметрических объектов.

Реальные объекты нелинейные, обладают последействием, а параметры их являются случайными, что ограничивает применение моделей в виде дифференциальных уравнений. Необходимо применять модели, позволяющие находить статистические закономерности функционирования экологических систем [9]. Данный вид моделей позволяет исследовать стохастические параметры и процессы с применением методов теории вероятности и математической статистики, а также и

модели, в которых зависимости одного фактора от другого определяются путем экспертного опроса [10]. Искомая статистическая функция может быть как функцией одной случайной независимой переменной (однофакторной), так и многих случайных переменных (многофакторной).

Особый интерес представляют модели, позволяющие исследовать стохастическую регрессию одного случайного фактора на другом случайном факторе экологического объекта.

При применении моделей этого вида, если рассматривать два и более случайных параметров экологической системы, их значения можно представить в виде точки в пространстве, соответственно двух-, трех- и более мерном. Статистические данные о таких величинах можно занести в таблицу с двумя, тремя и т.д. входами.

В двумерной табл. 1 показан общий вид представления данных об отклонениях от номинального значения гипотетических экологических параметров, например на некотором входе x экосистемы и на некотором выходе y этой же экосистемы. В табл. 1 фактически показана таблица распределения вероятностей или их оценок.

При большем числе исследуемых данных целесообразно применять описание исследуемых параметров в виде массива данных и осуществлять обработку данных с применением программного приложения.

В ячейках табл. 1 указывается вероятность $p(x_i, y_j)$ того, что в результате испытания случайная величина X примет значение x_i , и вместе с этим случайная величина Y примет значение y_j . Все события образуют полную группу. Сумма вероятностей табл. 1 равна единице, т. е. $\sum_i \sum_j p(x_i, y_j) = 1$.

Сумма вероятностей i -го столбца

$$p(x_i, y_1) + p(x_i, y_2) + \dots + p(x_i, y_j) + \dots + p(x_i, y_m) = \sum_j p(x_i, y_j) \quad (2)$$

представляет собой вероятность события $X=x_i$.

$$\sum_j p(x_i, y_j) = P(X = x_i) = p(x_i). \quad (3)$$

Сумма вероятностей j -й строки

$$p(x_1, y_j) + p(x_2, y_j) + \dots + p(x_i, y_j) + \dots + p(x_n, y_j) = \sum_i p(x_i, y_j) = P(Y = y_j) = p(y_j) \quad (4)$$

представляет собой вероятность события $Y=y_j$.

Таблица 1

Двумерное распределение

X Y	x_1	x_2	...	x_i	...	x_n	...
y_1	$p(x_1, y_1)$	$p(x_2, y_1)$	...	$p(x_i, y_1)$	...	$p(x_n, y_1)$	$p(y_1)$
y_2	$p(x_1, y_2)$	$p(x_2, y_2)$	...	$p(x_i, y_2)$	...	$p(x_n, y_2)$	$p(y_2)$
...
y_j	$p(x_1, y_j)$	$p(x_2, y_j)$	...	$p(x_i, y_j)$	...	$p(x_n, y_j)$	$p(y_j)$
...
y_m	$p(x_1, y_m)$	$p(x_2, y_m)$	...	$p(x_i, y_m)$	...	$p(x_n, y_m)$	$p(y_m)$
...	$p(x_1)$	$p(x_2)$	...	$p(x_i)$	...	$p(x_n)$	

Из табл. 1 распределения случайной двумерной величины получили одномерные законы распределения случайных величин X и Y в отдельности.

Чтобы исследовать влияние одного параметра экологической системы на изменение другого параметра, рассматривают условные законы распределения первого параметра при фиксированных значениях второго параметра.

Если параметр X получил значение $X=x_i$, то другой параметр Y может принять любое из своих возможных значений y_1, y_2, \dots , но вероятности этих значений будут отличаться от вероятностей $p(y_1), p(y_2)$.

Действительно, условная вероятность события $Y=y_j$ при событии $X=x_i$ будет равна $\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)}$. Обозначим эту вероятность через $p(y_j/x_i)$ так, что

$$p(y_j/x_i) = P(Y = y_j / X = x_i) = \frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)}. \quad (5)$$

Совокупность условных вероятностей $p(y_1/x_i), p(y_2/x_i), \dots, p(y_j/x_i), \dots$, соответствующих одному и тому же условию $X=x_i$, и называют условным распределением Y при $X=x_i$ [11].

Сумма условных вероятностей равна единице

$$\sum_j p(y_j/x_i) = \frac{\sum_j p(x_i, y_j)}{p(x_i)} = \frac{p(x_i)}{p(x_i)} = 1. \quad (6)$$

Для исследования параметров экологических систем наиболее важной характеристикой является условное математическое ожидание $M(Y/x)$ величины Y при фиксированном значении $X=x$, $x=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots\}$. Математическое ожидание определяется равенством

$$M(Y/x) = \sum_j y_j p(y_j/x), \quad (7)$$

где x – одно из значений $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$. Можно определить условные моменты более высоких порядков.

Приняв во внимание (3) и (5), определим (7) в виде выражения

$$\bar{y}(x) = M(Y/x) = \frac{\sum_j y_j p(x, y_j)}{\sum_j p(x, y_j)}, \quad (8)$$

которое определяет $M(Y/x)$ как функцию $M(Y/x) = \bar{y}(x)$, определенную для значений $x=x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$ и носящую название регрессии случайного параметра Y по случайному параметру X .

Также можно представить модель в виде условного распределения случайного параметра X при фиксированных значениях параметра $Y=y_j$, определяемого совокупностью условных вероятностей

$$p(x_i/y_j) = \frac{p(x_i, y_j)}{p(y_j)}, \quad i=1, 2, \dots, \quad (9)$$

причем

$$\sum_i p(x_i/y_j) = \frac{\sum_i p(x_i, y_j)}{p(y_j)} = \frac{p(y_j)}{p(y_j)} = 1. \quad (10)$$

Модель задается также в виде регрессии случайного параметра X по параметру Y :

$$\bar{x}(y) = M(X/y) = \sum_i x_i p(x_i/y) = \frac{\sum_i x_i p(x_i, y_j)}{p(y_j)}. \quad (11)$$

Модели (8) и (11) эффективны для статистического анализа состояния экологических объектов и осуществления вероятностных прогнозов, так как с их помощью выявляется стохастическая связь между параметрами экосистемы как в текущий момент, так и на выбранной последовательности моментов t_1, t_2, \dots, t_k .

Совместно с данным видом аналитической модели экосистем можно применять модели принятия решений, связанные с формализацией знаний экспертов относительно задания параметров моделей в виде нечетких и лингвистических переменных, а также правил принятия решений относительно оценки сложившейся ситуации либо прогноза развития состояний экосистемы. Особо эффективными модели принятия решений будут при прогнозировании развития состояния, так как оценка состояния может быть произведена по данным измерений реальных параметров, которые затем обработаны с применением возможностей стохастической регрессионной модели. Результаты стохастической регрессионной модели могут рассматриваться как элементы базовых множеств для задания функций принадлежности нечетких переменных из терм-множеств лингвистических переменных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулида Е.Л., Крюкова И.П., Лебедев В.Г. Экологический мониторинг в зоне влияния объектов хранения и уничтожения химического оружия // Автоматизация в промышленности. – М., 2007. – № 1. – С. 3-5.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 319 с.
3. Алибегова Ж.Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков. – М.: Гидрометеоздат, 1985. – 228 с.
4. Молоков М.В., Шифрин В.Н. Очистка поверхностного стока с территории городов и промышленных площадок. – М.: Стройиздат, 1977. – 102 с.
5. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоиздат, 1984. – 274 с.
6. Пригожин И., Стингерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогресс, 1986.
7. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985.
8. Grimm V. Ten years of individual-based modeling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? // Ecological modelling. – 1999. 115. – P. 129-148.
9. Сафарова В.И., Кудашева Ф.Х., Фахрутдинов А.А., Шайдулина Г.Ф. Экоаналитический контроль в системе оценки качества окружающей среды. – М.: Интер, 2004. – 228 с.
10. Финаев В.И., Павленко Е.Н. Методы искусственного интеллекта в задачах организации водно-химического режима тепловых электростанций. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 148 с.
11. Смирнов Б.Я., Дунин-Барковский И.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. – М.: Физматгиз, 1969. – 512 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.О. Чернышев.

Мамутов Батр Вячеславович

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: fin_val_iv@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371773.

Кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Mamutov Batr Vjacheslavovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: fin_val_iv@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371773.

The Department of Automatic Control Systems; Postgraduate Student.

УДК 621.82

Л.К. Самойлов

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ АНАЛОГОВЫХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ

Дается понятие аналоговых мультиплексоров, приводятся их характеристики: величина времени задержки, статическая погрешность коэффициента передачи, динамическая погрешность первого, второго рода, время задержки информации, максимальное значение первой производной сигнала на входе ключа, максимальное значение сигнала на входе ключа, выходное напряжение аналогового ключа, приращение входного напряжения за время начальной задержки включения ключа, относительная динамическая погрешность ключа.

Аналоговые мультиплексоры; динамическая погрешность; время задержки.

L.K. Samoilov

DYNAMIC ERRORS OF ANALOGUE MULTIPLEXERS

The article presents the concept of analog multiplexers, given their characteristics of: the value of the delay time, the static error of the transmission coefficient, the dynamic error of the first, second kind, the time delay information, maximum value of the first derivative of the input signal switch, the maximum value of the signal at key input, the output voltage analog switch, the increment of the voltage during the initial switch-on delay, the relative dynamic error of the key.

Analogue multiplexers; dynamic error; delay time.

Аналоговые ключи относятся к аналого-дискретным элементам [1]. Аналоговый ключ может быть реализован в виде отдельного устройства. Набор аналоговых ключей, работающих на один выход, с цепями выборки заданного ключа носит название аналогового мультиплексора (АМХ).

При подаче управляющего импульса выборки открытие ключа происходит с начальной задержкой t_0 относительно переднего фронта управляющего импульса.

Начальное время задержки колеблется от минимального значения ($t_0^{мин}$) до максимального (t_0^{max}). Величина времени задержки определяется типом микросхемы и условиями эксплуатации. В дальнейшем принимается, что

$$t_0 = t_0^{max}. \quad (1)$$

Ключ характеризуется следующими погрешностями:

- ◆ статической погрешностью коэффициента передачи ($\gamma_{ст}$);
- ◆ динамической погрешностью первого рода ($\gamma_{дин}^I$);
- ◆ динамической погрешностью второго рода ($\gamma_{дин}^{II}$).