зданного и существующего механизма информационного взаимодействия и, следовательно, о значительной вероятности того, что принятые в работе предположения и посылки правильные.

Кроме рассматриваемой системы, теоретические выводы проверялись в рамках учебно-лабораторного комплекса, выполненного на основе КЕТ. Полученные в других предметных областях результаты (моделирование логических схем ЭВМ) свидетельствуют об универсальности принятого подхода.

2. Практическая эффективность системы. Процесс доступа пользователя к информационной базе АСУС заключается в формулировке некоторой задачи, связанной с получением информации из информационной базы и контроля за правильностью «понимания» запроса.

Простота получения форм, безусловно, относится к практическим достоинствам системы. Однако имеются и недостатки:

а) для решения этих задач одновременно активизировалось до четырех модулей системы КЕТ на один запрос, реализующих все процессы его обработки в оперативной памяти компьютера. Это приводило к значительным временным задержкам в решении других задач пользователей;

б) пользователям, особенно тем, кто часто работал с ЭВМ, было неудобно вводить полное (или почти полное, допускались сокращения) наименование объекта, исполнителя и др. Поэтому в системе предусматривалось указание кода любого элемента справочников АСУС.

3. Затраты на систему. Они состоят из затрат на разработку программных средств и на обучение системы (таблица).

Программные средства	Затраты времени
формализации естественно-языковых тестов	0,3 чел.лет
доступа к информационной базе	2 чел.лет

На обучение системы затрачено около 50 часов. При этом была организована система информационных объектов, состоящая из: тезаурус – 4096 информационных объектов; связи – 8128; реакций системы – 200.

Как видно, затраты на систему значительно ниже затрат на аналогичные разработки [1,3,7]. Это можно объяснить эффективностью подходов на базе теории информационного взаимодействия по сравнению с используемыми в других системах принципами и методами организации естественно-языкового общения с компьютером.

В целом, результаты опытной эксплуатации системы показали ее значительные возможности и, по мнению автора, данный подход может быть использован в широком спектре систем искусственного интеллекта.

Литература: 1. *Белогонов Г.Г., Кузнецов Б.А.* Языковые средства автоматизированных информационных систем. М.: Наука, 1983. 288 с. 2. *Бушуев С.Д., Михайлов В.С., Лянко С.Д.* Автоматизированные системы управления строительством. К.: Будівельник, 1989. 255 с. 3. *Искуственный интеллект:* Системы общения и экспертные системы: Справочник / Под ред. Э.В.Попова. М.: Радио и связь, 1990. 463с. 4. *Тесля Ю.М., Тимченко А.А.* Опыт разработки и применения в строительстве инструментальных программных средств естественно-языкового общения// К.: МГП «Тираж». С. 226-228. 5. *Тесля Ю.М.* Основи теорії інформаційної взаємодії. Філософсько-логічне та фізичне обгрунтування // Вісник ЧІТІ, 1998. №2. С. 62-68. 6. *Тесля Ю.М.* Застосування теорії інформаційної взаємодії до побудови систем класифікації образів // Праці сьомої міжнародної конференції «Укробраз 98», К., 1998. С.122-123. 7. *Файн В.С.* Распознавание образов и машинное понимание естественного языка. М.: Наука, 1987. 173 с. 8. *Тесля Ю.М.* Основи теорії інформаційної взаємодії. Експериментальне підтвердження//Вісник ЧІТІ, 1998. №2. С. 69-74. 9. *Тесля Ю.М., Копил Д.В.* Експериментальне підтвердження можливості застосування математичної моделі інформаційної взаємодії до задач природно-мовного спілкування// Праці 4-ї Української конференції по автоматичному управлінню «Автоматика 97». Черкаси, 1997. Т.3. С. 77. 10. *Гриценко В.И., Тимченко А.А., Тесля Ю.Н.* Подходы к информатизации объектов энергетического строительства. К., 1995. 32 с.

Поступила в редколлегию 16.12.1998

Рецензент: д-р техн. наук Тимченко А.А.

Тесля Юрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры информатики Черкасского инженерно-технологического института. Научные интересы: автоматизированные информационные системы и технологии управления строительством сложных энергетических объектов; гипотетическая теория информационного взаимодействия. Увлечения: футбол. Адрес: Украина, 257006, Черкассы, ул. Чехова, 42, кв.428, тел. (0472)43-61-60.

УДК 681.513.6

АДАПТИВНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ПОЛЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ

ПЛИСС И.П., ПОПОВ С.В.

Рассматривается сглаживание двумерных полей наблюдений, которое производится на основе оригинальной матричной модели. Ее параметры настраиваются при помощи адаптивного алгоритма оценивания.

Данная работа является естественным развитием статьи [1], в которой рассмотрены вопросы адаптивной фильтрации и экстраполяции полей наблюдений на основе предложенного ранее одношагового адаптивного оптимального по быстродействию матричного алгоритма оценивания параметров поля.

Одношаговые алгоритмы, обладая хорошими следящими свойствами, тем не менее, плохо работают в условиях зашумленности наблюдений, что не позволяет использовать их в задачах сглаживания. В этих условиях целесообразно применять многошаговые процедуры типа фильтра Калмана или рекуррентного метода наименьших квадратов, обладающих выраженными сглаживающими свойствами.

Как и в предыдущей статье, для описания поля используется матричный аналог марковского дискретного случайного процесса

$$X_{n+1} = AX_nB + W_{n+1}, \qquad (1)$$

где X_n – $(M \times N)$-матрица состояния поля в дискретный момент времени n; A и B – $(M \times M)$ и $(N \times N)$-

матрицы неизвестных параметров преобразования; W_n – дискретный матричный белый шум.

В принципе, описание (1) может быть приведено к традиционному матрично-векторному виду

$$\overset{+}{X}_{n+1} = (B^T \otimes A)\overset{+}{X}_n + \overset{+}{W}_{n+1} = C\overset{+}{X}_n + \overset{+}{W}_{n+1}, \quad (2)$$

(здесь $\otimes$ – символ тензорного произведения; $\overset{+}{\bullet}$ – символ столбцовой векторизации [2]), после чего для оценивания матрицы параметров C может быть использован рекуррентный метод наименьших квадратов в форме

$$\begin{cases} C_{n+1} = C_n + \dfrac{\left(\overset{+}{X}_{n+1} - C_n\overset{+}{X}_n\right)\overset{+}{X}{}_n^T\,\Gamma_n}{1+\overset{+}{X}{}_n^T\,\Gamma_n\,\overset{+}{X}_n}, \\ \Gamma_{n+1} = \Gamma_n - \dfrac{\Gamma_n\,\overset{+}{X}_n\,\overset{+}{X}{}_n^T\,\Gamma_n}{1+\overset{+}{X}{}_n^T\,\Gamma_n\,\overset{+}{X}_n}, \end{cases} \quad (3)$$

где C_n – настраиваемые параметры модели

$$\hat{X}_{n+1} = \underset{+}{\left(C\overset{+}{X}_n\right)}, \quad (4)$$

поставленной в соответствие (1); $\underset{+}{\bullet}$ – символ девекторизации.

Здесь нужно отметить, что если описание поля (1) содержит $M^2 + N^2$ параметров, то в модели (4) их уже $(MN)^2$, что резко усложняет использование рекуррентного метода наименьших квадратов даже в простых реальных задачах.

В связи с этим возникает задача синтеза алгоритмов оценивания неизвестных параметров матриц A и B в (1), обладающих высокими сглаживающими качествами, на основе настраиваемой модели вида

$$\hat{X}_{n+1} = A_n X_n B_n, \quad (5)$$

содержащей $M^2 + N^2 << (MN)^2$ параметров.

Для синтеза таких процедур рассмотрим вначале матричный объект вида

$$X_{n+1} = GY_n + W_{n+1}, \quad (6)$$

где Y_n – $(M\times N)$-матрица экзогенных переменных; G – $(M\times M)$-матрица неизвестных параметров, подлежащих определению. Введем в рассмотрение критерий идентификации

$$\begin{aligned} J_n^G &= \sum_{i=1}^{n-1}\|V_i\|^2 = \\ &= \sum_{i=1}^{n-1}\mathrm{Tr}\left(X_{i+1} - G_nY_i\right)\left(X_{i+1} - G_nY_i\right)^T, \end{aligned} \quad (7)$$

здесь G_n – оценка матрицы G, полученная в результате обработки всех наблюдений двумерного поля; Tr – символ следа матрицы.

Решение системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_n^G}{\partial G_n} &= -\sum_{i=1}^{n-1}X_{i+1}Y_l^T + G_n\sum_{i=1}^{n-1}Y_iY_l^T = \\ &= -r_n + G_nR_n = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

позволяет получить искомую оценку в виде

$$G_n = r_nR_n^{-1}, \quad (9)$$

которая в (n+1)-й момент времени может быть представлена выражением

$$G_{n+1} = r_{n+1}R_{n+1}^{-1}. \quad (10)$$

Введем рекуррентную процедуру уточнения матрицы оценок

$$\begin{aligned} G_{n+1} &= G_n + \left(r_{n+1} - G_nR_{n+1}\right)\Gamma_{n+1}^G = \\ &= G_n + \left(X_{n+1} - G_nY_n\right)Y_n^T\Gamma_{n+1}^G, \end{aligned} \quad (11)$$

которая с учетом (9), (10) может быть переписана в форме

$$r_{n+1}R_{n+1}^{-1} = r_nR_n^{-1} + \left(r_{n+1} - r_nR_n^{-1}R_{n+1}\right)\Gamma_{n+1}^G. \quad (12)$$

Несложно видеть, что (12) обращается в тождество при $\Gamma_{n+1}^G = R_{n+1}^{-1}$, что позволяет переписать алгоритм идентификации в виде

$$G_{n+1} = G_n + \left(X_{n+1} - G_nY_n\right)Y_n^TR_{n+1}^{-1}. \quad (13)$$

Записав очевидное соотношение

$$R_{n+1} = R_n + Y_nY_n^T \quad (14)$$

и применив лемму об обращении матриц, получим

$$\begin{aligned} R_{n+1}^{-1} &= \left(R_n + Y_nY_n^T\right)^{-1} = \\ &= R_n^{-1} - R_n^{-1}Y_n\left(I + Y_n^TR_n^{-1}Y_n\right)^{-1}Y_n^TR_n^{-1} = \\ &= \left(I + R_n^{-1}Y_nY_n^T\right)^{-1}R_n^{-1} = \Gamma_{n+1}^G = \\ &= \Gamma_n^G - \Gamma_n^GY_n\left(I + Y_n^T\Gamma_n^GY_n\right)^{-1}Y_n^T\Gamma_n^G = \\ &= \left(I + \Gamma_n^GY_nY_n^T\right)^{-1}\Gamma_n^G, \end{aligned} \quad (15)$$

здесь I – единичная матрица соответствующей размерности.

Аналогичным образом, рассматривая объект

$$X_{n+1} = Z_nH + W_{n+1}, \quad (16)$$

где Z_n – $(M\times N)$-матрица входных сигналов; H – $(N\times N)$-матрица неизвестных параметров, можно получить матрицу оценок

$$H_n = P_n^{-1}p_n, \quad (17)$$

где $P_n = \sum_{i=1}^{n-1}Z_i^TZ_i$, $p_n = \sum_{i=1}^{n-1}X_{i+1}^TZ_i$.

Алгоритм идентификации при этом может быть представлен в форме

$$\begin{cases} H_{n+1} = H_n + \Gamma_{n+1}^HZ_n^T\left(X_{n+1} - Z_nH_n\right), \\ \Gamma_{n+1}^H = \left(I + \Gamma_n^HZ_n^TZ_n\right)^{-1}\Gamma_n^H. \end{cases} \quad (18)$$

Возвращаясь к объекту (1), который представим в виде

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= AX_nB + W_{n+1} = \\ &= AY_n + W_{n+1} = Z_nB + W_{n+1}, \end{aligned} \quad (19)$$

запишем рекуррентные соотношения для идентификации матриц параметров A и B:

$$\begin{cases} A_{n+1} = A_n + \left(X_{n+1} - A_n Y_n\right) Y_n^T \Gamma_{n+1}^A, \\ \Gamma_{n+1}^A = \left(I + \Gamma_n^A Y_n Y_n^T\right)^{-1} \Gamma_n^A, \\ Y_n = X_n B_n \end{cases} \tag{20}$$

и

$$\begin{cases} B_{n+1} = B_n + \Gamma_{n+1}^B Z_n^T \left(X_{n+1} - Z_n B_n\right), \\ \Gamma_{n+1}^B = \left(I + \Gamma_n^B Z_n^T Z_n\right)^{-1} \Gamma_n^B, \\ Z_n = A_{n+1} X_n \end{cases} \tag{21}$$

или

$$\begin{cases} A_{n+1} = A_n + \left(X_{n+1} - A_n X_n B_n\right) B_n^T X_n^T \Gamma_{n+1}^A, \\ \Gamma_{n+1}^A = \left(I + \Gamma_n^A X_n B_n B_n^T X_n^T\right)^{-1} \Gamma_n^A, \\ B_{n+1} = B_n + \Gamma_{n+1}^B X_n^T A_{n+1}^T \left(X_{n+1} - A_{n+1} X_n B_n\right), \\ \Gamma_{n+1}^B = \left(I + \Gamma_n^B X_n^T A_{n+1}^T A_{n+1} X_n\right)^{-1} \Gamma_n^B. \end{cases} \tag{22}$$

Система соотношений (22) описывает алгоритм рекуррентного метода наименьших квадратов для настройки параметров матричной модели (5). При этом, используя полученные параметры, несложно получить сглаженную оценку поля в любой точке $1 \le i \le n+1$:

$$X_i^S = A_{n+1} X_{i-1} B_{n+1}. \tag{23}$$

Предлагаемый алгоритм может быть также использован для оценивания параметров матричных уравнений авторегрессии вида [1, 3]:

$$X_{n+1} = \sum_{h=0}^{r-1} A^{h+1} X_{n-h} B^{h+1} + W_{n+1}. \tag{24}$$

Вводя в рассмотрение матрицы

$$\widetilde{A} = \left(A^1 \,\vdots\, A^2 \,\vdots\, \cdots \,\vdots\, A^r\right),$$

$$\widetilde{B} = \begin{pmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^r \end{pmatrix}, \quad \widetilde{X}_n = \begin{pmatrix} X_n & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & X_{n-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & X_{n-r+1} \end{pmatrix},$$

можно переписать (24) в компактной форме:

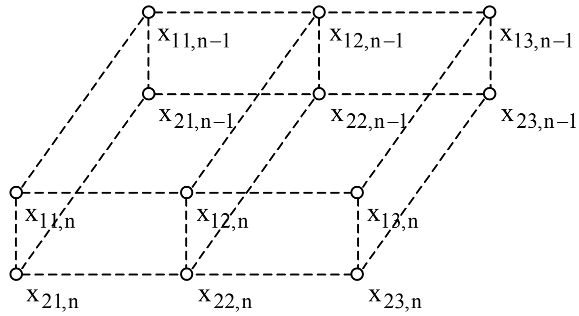
$$X_{n+1} = \widetilde{A} \widetilde{X}_n \widetilde{B} + W_{n+1} \tag{25}$$

и с помощью алгоритма (22) настраивать модель

$$\hat{X}_{n+1} = \widetilde{A}_n \widetilde{X}_n \widetilde{B}_n. \tag{26}$$

Однако при этом для организации вычислительного процесса следует перейти от трехиндексной нумерации данных в (24) $-\left(x_{ij,n-h}\right)$ к двухиндексной в модели (26) $-\left(\widetilde{x}_{kl}\right)$. Этот переход рассмотрим на простейшем примере для M=2, N=3, r=2. При использовании описания (24) данные можно представить в виде параллелепипеда, изображенного на рисунке, а при использовании модели (26) – в виде плоской матрицы

$$\widetilde{X}_n = \begin{pmatrix} x_{11,n} & x_{12,n} & x_{13,n} & 0 & 0 & 0 \\ x_{21,n} & x_{22,n} & x_{23,n} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{11,n-1} & x_{12,n-1} & x_{13,n-1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{21,n-1} & x_{22,n-1} & x_{23,n-1} \end{pmatrix}. \tag{27}$$



Представление данных

Тогда переход от индексов в параллелепипеде $i = 1, 2, ..., M$; $j = 1, 2, ..., N$; $h = 0, 1, ..., r-1$ к индексам плоской матрицы может быть задан в форме

$$\begin{cases} k = i + hM, \\ l = j + hN, \end{cases} \tag{28}$$

$k = 1, 2, ..., Mr$; $l = 1, 2, ..., Nr$. Все элементы $\widetilde{x}_{kl}$, индексы которых не могут быть вычислены с помощью соотношений (28), полагаются нулевыми. Заметим также, что при этом должно быть рассчитано $\left(M^2 + N^2\right)r$ параметров, а сглаженная оценка поля имеет вид

$$X_i^S = \widetilde{A}_{n+1} \widetilde{X}_{i-1} \widetilde{B}_{n+1}. \tag{29}$$

В заключение отметим, что если X_n – суть скалярная стохастическая последовательность, приходим к стандартной процедуре оценивания параметров АР-уравнения с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов [4].

Литература: 1. *Плисс И.П.*, *Попов С.В.* Адаптивная фильтрация и экстраполяция полей наблюдений // Радиоэлектроника и информатика. 1997. №1. С. 60-62. 2. *Гришин В.Н.*, *Дятлов В.А.*, *Милов Л.Т.* Модели, алгоритмы и устройства идентификации сложных систем. Л.: Энергоатомиздат. 1985. 104 с. 3. *Бодянский Е.В.*, *Плисс И.П.* О решении задач дискретной адаптивной идентификации, экстраполяции и управления двумерными полями. Харьков: ХИРЭ. 1993. 23 с. Деп. в ГНТБ Украины 03.11.93, №2175-Ук93. 4. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. М.:Наука. 1991. 432 с.

Поступила в редколлегию 07.12.1998

Рецензент: д-р техн. наук Бодянский Е.В.

Плисс Ирина Павловна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ АСУ ХТУРЭ. Научные интересы: адаптивные системы обработки информации и управления. Увлечения: фелинология, приготовление экзотических блюд. Адрес: Украина, 310726, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-98-90.

Попов Сергей Витальевич, аспирант кафедры ТК ХТУРЭ. Научные интересы: адаптивная обработка информации в многомерных системах. Увлечения: музыка, компьютеры, автомобили. Адрес: Украина, 310726, Харьков, пр. Ленина, 14.

E-mail: Serge.Popov@writeme.com