АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ
№ 5 1982

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

УДК 519.67

А. Н. ВЫСТАВКИН, Л. Л. КОСАЧЕВСКАЯ, В. В. РОМАНОВЦЕВ,
И. Е. ШПАРЛИНСКИЙ
(Москва)

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Введение. Одной из важных проблем автоматизации лабораторного эксперимента является обработка зависимостей, наблюдаемых в эксперименте и представленных в виде совокупности дискретных отсчетов, полученных с некоторой точностью. При анализе этих зависимостей и сопоставлении их с физическими моделями возникает несколько задач, а именно: а) восстановление зависимостей, искаженных системой измерений; б) преобразование восстановленных зависимостей с целью получения новых, непосредственно сравнимых с физической моделью наблюдаемого явления; в) параметрическое сопоставление формализованной физической модели наблюдаемого явления с полученными в «б» зависимостями.

Все три задачи допускают множество способов решения, а соответствующие алгоритмы широко обсуждаются как в математической, так и в физической литературе. В большинстве случаев, однако, решение этих задач выходит за рамки автоматизированных систем проведения эксперимента и ведется с широким применением ЭВМ в режимах «off line» после эксперимента. В последнее время появились интересные работы по созданию и исследованию многофункциональных диалоговых систем, способных решать относительно большой класс задач такого рода в режиме, значительно упрощающем процесс формализации конкретной решаемой задачи. При этом используются наиболее мощные из известных сегодня решающих алгоритмов [1]. Такие развитые диалоговые системы, как правило, не допускают непосредственного сопряжения с реальным физическим экспериментом (ввиду узости конкретной физической задачи и высокой стоимости систем). В силу этого представляется целесообразным создание проблемно-ориентированных программных систем, позволяющих обслуживать некоторый класс задач обработки получаемых в ходе эксперимента данных и способных решать их диалоговыми методами в той же вычислительной среде, которая осуществляет сбор данных и управление экспериментом. В настоящей работе описывается попытка создания программной системы, ориентированной на решение первой из упомянутых задач, а именно задачи восстановления экспериментальных зависимостей, искаженных системой измерений,— решение уравнений $\widehat{A}\overline{u}=\overline{f}$, где $\widehat{A}$ — линейный оператор, $\overline{f}$ — измеренная зависимость, $\overline{u}$ — истинная зависимость.

Описываемая система была применена в ИРЭ АН СССР для решения задач восстановления в ряде радиофизических экспериментов.

1. Структура системы. Система построена по иерархическому принципу и имеет древовидную структуру, но допускает использование отдельных подпрограммных ветвей внутри программ пользователя. Язык реализации — ФОРТРАН-77.

Одним из наиболее важных элементов системы является файл параметров (ФП), используемый практически всеми элементами программной системы. Этот файл содержит как символьную (имена файлов элементов задачи, методов решений, графических параметров; описатели форматов имеющихся данных), так и числовую информацию (число исходных и искомых элементов, интервалы задания правой части и решения, погрешность исходных данных, кодовые номера типа оператора задачи, пространства решений, схемы конечно-разностной аппроксимации, априорной информации и др.).

Диалог носит характер вопросов и ответов и реализован с помощью набора таблиц, хранимых в специальном табличном файле и вызываемых одной мониторной программой.

Комплекс использует оверлейные возможности операционной системы SINTRAN-III, а также файловую систему ЭВМ «Nord-10/S». Графическая часть системы базируется на разработанном в ИРЭ АН СССР графическом пакете GRINEKS (Graphic Interactive Eksperiment System), ориентированном на интерактивный режим работы с графическим терминалом одной из следующих моделей («Тектроникс-4006, 4010, 4012, 4025, 4662») [2].

2. **Используемые алгоритмы решения задачи** $\widehat{A}\overline{u}=\overline{f}$. 2.1. *Метод обобщенной невязки* [3]. По совокупности $\{\widehat{A}, \overline{f}\}$ находится мера состоятельности входной информации μ [3]:

$$\mu = \inf_{\overline{g}\in R^n} \|\widehat{A}\overline{g} - f\|,$$

n — число узлов сеточной функции $\overline{f}$.

Ищется экстремаль функционала Тихонова $\overline{u}_\alpha$ [4], т. е. решается соответствующее уравнение Эйлера:

$$(\alpha L + \widehat{A}^*\widehat{A})\overline{u}_\alpha = \widehat{A}^*\overline{f},$$

где α — параметр регуляризации; L — линейный оператор; звездочка означает процедуру транспонирования матрицы, соответствующей оператору $\widehat{A}$.

Выбирается такое α, которое удовлетворяет уравнению [5]

$$\|\widehat{A}\overline{u}_\alpha - \overline{f}\|^2 - (\delta + \varkappa\|\overline{u}_\alpha\|^2) - \mu = 0.$$

Здесь

$$\delta = n \max_{1\leqslant i\leqslant n} |f_i|, \quad \varkappa = n^2 \max_{1\leqslant i,j\leqslant n} |A_{ij}|.$$

Соответствующая $\overline{u}_{\alpha_{\text{extr}}}$ является приближенным решением задачи.

2.2. *Метод итераций* [6]. Определяются M и m — верхняя и нижняя границы спектра оператора $\widehat{A}$ — методом, описанным в [1].

Последовательными итерациями находится решение

$$\overline{u}_k = \overline{u}_{k-1} - \alpha_k(\widehat{A}\overline{u}_{k-1} - \overline{f}), \quad k = 1, 2, \ldots,$$

где $\alpha_k = 2/[M + m - (M - m)\cos \pi p(k)]$, $p(k) = 2^{-1}e_1 + \ldots + 2^{-r}e_r$, $k = e_1 + \ldots + 2^{r-1}e_r$ — разложение числа k по степеням 2.

2.3. *Метод итераций с регуляризацией* [7]. Последовательными итерациями ищется приближенное решение в виде [7]

$$\overline{u}_k = \overline{u}_{k-1} + \widehat{D}\widehat{A}^*(\overline{f} - \widehat{A}\overline{u}_{k-1}), \quad k = 1, 2, \ldots,$$

$\widehat{D} = (\widehat{A}^*\widehat{A} + \gamma\widehat{I})^{-1}$, $\widehat{I}$ — единичная матрица, γ — параметр сглаживания.

2.4. *Метод деконволюции с помощью кубических B-сплайнов (для уравнений типа свертки с дельтообразным ядром)* [8]. Строится кубический B-сплайн, аппроксимирующий правую часть уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(s)\,\sigma(x - s)\,ds = S(x), \quad S(x) = S_k(x) = A_kx^3 + B_kx^2 + C_kx + D_k,$$

где $x \in [\xi_k, \xi_{k+1}]$, а ξ_k — система узлов, в которых задана правая часть, $k = 1, \ldots, n$.

Вычисляются первые четыре момента ядра

$$M_\nu = \int_{-\infty}^{\infty} s^\nu K(s)\, ds, \ \nu = 0, 1, 2, 3.$$

Для всех $k = 1, \ldots, n$ определяются $a_k = M_0 A_k$, $b_k = M_0(B_k + 3a_k M_1)$, $c_k = M_0(C_k + 2b_k M_1 - 3a_k M_2)$, $d_k = M_0(D_k + c_k M_1 - b_k M_2 - a_k M_3)$, а затем строится функция $\sigma(x) = \sigma_k(x) = a_k x^3 + b_k x^2 + c_k x + d_k$, $x \in [\xi_k, \xi_{k+1}]$, приближающая решение исходного уравнения.

Все перечисленные методы содержат параметр, изменяя который можно добиться наилучшего достижимого приближения. В методе 2.1 это параметр α, в методах 2.2 и 2.3 — число итераций и (или) параметр γ (см. 2.3), а в методе 2.4 — число узлов функции $\bar{f}$, по которым ведется сплайн-аппроксимация.

Как уже отмечалось, описываемая система обладает возможностями непосредственного графического представления результатов расчета в процессе решения и дает исследователю возможность ускорить, замедлить или остановить процесс получения приближенного решения по достижению визуального оптимума искомой функции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марчук Г. И.** Методы вычислительной математики.— М.: Наука, 1980.
2. **Обухов Ю. В., Платонов С. А.** Диалоговая система построения графиков в измерительно-вычислительной системе коллективного пользования.— УСиМ, 1981, № 6.
3. **Тихонов А. Н.** Некорректно поставленные задачи и методы их решения.— В кн.: Труды Всесоюз. школы молодых ученых «Методы решения некорректных задач и их применения». М.: МГУ, 1974.
4. **Михлин С. Г.** Вариационные методы в математической физике.— М.: Наука, 1970.
5. **Галкин В. Я. и др.** О методах решения стохастических систем линейных алгебраических уравнений.— В кн.: Обработка и интерпретация физических экспериментов. М.: МГУ, 1977, вып. 6, с. 61—97.
6. **Косачевская Л. Л., Романовцев В. В., Шпарлинский И. Е.** Об одном итерационном процессе численного решения СЛАУ.— Журнал вычисл. математики и матем. физики, 1981, т. 21, № 6.
7. **Strand O. N.** Theory and Methods Related to the Singular-Function Expansion and Landweber's Iteration for Integral Equation of the First Kind.— SIAM J. Numer. Anal., 1974, vol. 11, N 4.
8. **Beniaming I., Deutsch M.** A Spline-Based Method for Experimental Data Deconvolution.— Comput. Phys. Comm., 1980, vol. 21, p. 271—277.

Поступила в редакцию 27 августа 1981 г.

УДК 621.372.542

А. В. ЗЕЛЕНКОВ

(Рига)

ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОГО ВРЕМЕННОГО СДВИГА ОТРАЖЕНИЙ В АДДИТИВНОМ СИГНАЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ НУЛЕЙ Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ЕДИНИЧНОЙ ОКРУЖНОСТИ

Введение. Согласно определению комплексного кепстра [1], если нули и полюсы z-преобразования сигнала $S(z)$ находятся на единичной окружности, то кепстр, строго говоря, не существует. К сигналам такого вида относятся не только аддитивные сигналы, у которых нули появляются в результате суммирования, например, двух равновеликих отраже-