

2. Марчук Г. И. Методы расщепления / Г. И. Марчук. — М. : Наука, 1988. — 264 с.
3. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. — 5-е изд. — М. : Наука, 1977. — 735 с.

Algorithm for accuracy testing of results obtained by using adaptive grid building method applied to the solving of 3D heat equation which is used to model the process of laser heating of thin plate, is reviewed.

Key words: *adaptive grid, 3D heat equation, Lagrange interpolation formulae.*

Отримано: 11.10.2012

УДК 621.381.82

И. В. Мирошниченко, старший преподаватель

Национальный технический университет Украины “КПИ”, г. Киев

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ КЛАССИФИКАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Предлагается вариант классификатора задач статистических измерений для этапа внешнего проектирования систем обработки экспериментальных данных. Способ классификации может найти применение в новых информационных технологиях при формировании математических моделей предметных областей и разработке алгоритмов и программ.

Ключевые слова: *предметная область, случайные процессы, классификатор измерительных задач, основные и дополнительные идентификаторы, погрешность классификации, статистические измерения, информационные технологии.*

Вступление. Целью экспериментальных исследований в различных предметных областях является измерение мгновенных значений $x_i(t_j)$ сигналов $x(t)$, несущих информацию о физических процессах, которые могут быть описаны вероятностными математическими моделями, чаще всего в виде случайного процесса. Результаты измерений $x_i(t_j)$ служат для вычисления оценок $\Theta^*[x(t)]$ различных статистических характеристик $\Theta[x(t)]$ случайных процессов в системах обработки экспериментальных данных (СОЭД). Несоответствие реальных процессов в предметных областях приписываемым им моделям, сформированным по результатам вычисления $\Theta^*[x(t)]$, характеризуется *погрешностью классификации*, оценка которой является основной задачей боль-

шинства научных исследований и составляет основное содержание этапа внешнего проектирования СОЭД.

Постановка задачи. Основной проблемой при вычислении оценок $\Theta^*[x(t)]$ является их большое разнообразие для различных условий проведения эксперимента, что диктует необходимость классификации статистических измерительных задач, их идентификации и представления в виде числового кода для внешнего проектирования, которое заканчивается разработкой технического задания для этапа внутреннего проектирования, на котором разрабатываются алгоритмы и программы изготовления СОЭД.

Актуальность задачи классификации статистических измерительных задач обусловлена применением CALS-технологий непрерывной информационной поддержки (Continues Acquisition and Life cycle Support — CALS), которые позволяют сократить сроки проектирования современных аналого-цифровых СОЭД.

Анализ исследований. Классификация статистических измерительных задач основана [12] на использовании четырех признаков: X — класса исследуемого сигнала $x(t)$; Θ — вида $\Theta^*[x(t)]$ статистической характеристики; S — типа используемого оператора усреднения при вычислении оценок $\Theta^*[x(t)]$ и J — типа организации измерительного эксперимента.

Случайные процессы принято [10; 12] разделять на 7 классов: локально-стационарный локально-эргодический (ЛСЛЭ), локально-стационарный неэргодический (ЛСНЭ), стационарный эргодический (СЭ), стационарный неэргодический (СНЭ), нестационарный локально-эргодический (НСЛЭ), нестационарный эргодический (НСЭ) и нестационарный неэргодический (НСНЭ).

Виды статистических характеристик Θ ограничены четырьмя

Θ_{cp} — средних значений (выборочные средние оценки),

Θ_t — “ t — текущие оценки”,

Θ_k — “ k — текущие оценки” и

Θ_{kt} — “ kt — текущие оценки”.

Первые два признака — X и Θ определяются объективной характеристикой измерительной задачи и определяют направление внешнего проектирования СОЭД.

Третий признак (S) — тип идеального оператора усреднения:

S_N — усреднение по множеству или ансамблю N реализаций,

S_t — усреднение за время t реализации,

S_{Nt} — усреднение по множеству N реализаций и по времени t .

Введение идеальных операторов усреднения S_N, S_t, S_{Nt} позволяет получить, в отличие от несостоятельных (НС), состоятельные (СО) оценки Θ^* , и, в отличие от смещенных (СМ), несмещенные (НСМ) оценки Θ^* при объёме выборки $d \rightarrow \infty$ и выполнении условий нормировки.

Четвертый признак (J) характеризует принцип формирования массивов $\{*\}$ экспериментальных данных (результатов измерения). Признаки (S) и (J) являются субъективными характеристиками измерительного эксперимента.

По такому $X - \Theta - S - J$ — классификатору [12] задачи измерений оценок $\Theta^*[x(t)]$ статистических характеристик Θ случайных процессов обозначаются в виде ряда чисел, разделенных чертой. При этом для различных сочетаний $X - \Theta - S - J$ получается около 150 типовых измерительных задач.

Цель работы. Предлагается ввести десятичный *JSTX a.b.* классификатор, в который входят *основные и дополнительные идентификаторы*, позволяющие ввести статистические характеристики различного вида и порядка, в том числе и не имеющие аналогов в теории вероятностей, как то кумулянтов [7], характеристик выбросов траекторий процесса над порогом [8; 11] и характеристических функций $\Theta(u)$.

Результаты исследования. *Основные идентификаторы* (большие буквы латинского алфавита J, S, T и X) содержат только *одну цифру* и обозначают: $J \in \overline{1...3}$ — процедуру формирования массива $\{*\}$; т.к. $\Theta^*[x(t)]$ могут изменяться за счет изменения объёма выборки от эксперимента к эксперименту. Поэтому J -идентификатор является определяющим при проектировании СОЭД. Например, по изменению математического ожидания M при фиксированном объёме выборки можно судить как о нелинейности процесса, так и о погрешности классификации по принятой математической модели. Могут изменяться или время измерения t или число реализаций N , но при этом свойства (СО, НС, СМ и НСМ) оценок $\Theta^*[x(t)]$, могут не изменяться; $S \in \overline{1...3}$ — типы идеального оператора усреднения ($S_N S_t S_{Nt}$); $T \in \overline{1...4}$ — вид оценки $\Theta^*[x(t)]$ и $X \in \overline{1...4}$ — вид анализируемого исходного сигнала $x(t)$, несущего информацию о физи-

ческом процессе, представленном вероятностной математической моделью в виде случайного процесса $\xi(t)$.

Дополнительные идентификаторы (малые буквы латинского алфавита a и b) вводятся для учёта особенностей измерительных статистических задач в радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии, медицине, физике плазмы, гидроакустике и др. Дополнительные идентификаторы отделены точкой от основных идентификаторов X, T, S, J , разделены точками, содержат по две цифры и обозначают: $a \in (01, \dots, 09)$ — порядок измеряемой оценки $\Theta_k^*[x(t)]$. Практически значение $a \leq 5$ ограничивается физической трактовкой Θ и возможностями аппаратной реализации [9] измерителей Θ_k^* ; $b \in (01 \dots 99)$ — условный номер оценки $\Theta^*[x(t)]$, так как часто $\Theta^*[x(t)]$ малых порядков имеют специальные наименования.

Таблица 1

Классификатор статистических измерительных задач

Идентификатор	Содержание идентификатора
J	Обозначение процедуры формирования массива данных $\{*\}$ о мгновенных значениях $x_i(t_j)$ сигнала $x(t)$, несущего информацию о физическом процессе
$J = 1$	Массив $\{*\}$ формируется в каждом отдельном эксперименте на различных интервалах $\left\{ \left[t_j - T_1, t_j + T_2 \right] \right\}$ одной и той же совокупности реализаций $\left\{ (i)_{K-N_i}^{K+N_2} \right\}$
$J = 2$	Массив $\{*\}$ формируется в каждом эксперименте на одних и тех же интервалах времени $\left[t - T_1, t + T_2 \right]$ различных совокупностей реализаций $\left\{ (i)_{j-N_i}^{j+N_2} \right\}$
$J = 3$	Массив $\{*\}$ формируется в каждом эксперименте на различных временных интервалах $\left\{ \left[t_j - T_1, t_j + T_2 \right] \right\}$ различных совокупностей реализаций $\left\{ (i)_{j-N_i}^{j+N_2} \right\}$
S	Обозначение типа идеального оператора усреднения
$S = 1$	Усреднение по множеству N реализаций — S_N
$S = 2$	Усреднение за время реализации t — S_t
$S = 3$	Усреднение по множеству N и по времени t — S_{Nt}

Продолжение таблицы 1

<i>T</i>	Вид оценки $\Theta^*[x(t)]$
$T = 1$	Θ_{cp} — средние оценки (выборочные средние значения)
$T = 2$	Θ_t — “ t — текущие оценки”
$T = 3$	Θ_k — “ k — текущие оценки”
$T = 4$	Θ_{kt} — “ kt — текущие оценки”
<i>X</i>	Вид случайного процесса $\xi(t)$
$X = 1$	Стационарный эргодический — СЭ
$X = 2$	Стационарный неэргодический — СНЭ
$X = 3$	Нестационарный эргодический — НСЭ
$X = 4$	Нестационарный неэргодический — НСНЭ
$a \in 01...99$	Порядок измеряемой оценки $\Theta^*[x(t)]$
$a = 01$	Первый порядок оценки, средние значения
$a = 02$	Второй порядок оценки при квадратичных преобразованиях
$a = 03$	Третий порядок оценки, например асимметрия случайного процесса, близкого к нормальному $\xi(t)$
$a = 04$	Четвертый порядок оценки, например эксцесс случайного процесса, близкого к нормальному $\xi(t)$
$a \in 05..99$	Оценки высоких порядков (начальные α_k и центральные μ_k моменты)
$b \in (01..99)$	Условный номер именованной оценки Θ^*
$b = 01$	Математическое ожидание $M[x(t)]$ или начальный момент 1-го порядка α_1
$b = 02$	Дисперсия σ^2, D , СКО или центральные моменты 2-го порядка μ_2
$b = 03$	Спектральные характеристики и функции
$b = 03$	Корреляционные функции и зависимости
$b = 03$	Кумулянты k -го порядка C_k
$b = 05$	Характеристические функции $\Theta(u)$
$b = 06$	Характеристики выбросов траектории случайного процесса над порогом
$b \in 07..99$	Специальных названий не имеют

Например, “1233.01.06.” — цифровое обозначение измерительной задачи по предлагаемому $JSTX a.b$ — классификатору.

При раскрытии этого цифрового обозначения, следуя справа налево, получаем, согласно Таблице 1, задачу измерения статистической характеристики Θ выбросов траектории сигнала $x(t)$ над порогом ($b =$

06) нестационарного эргодического случайного процесса ($X = 3$), у которого текущая оценка ($T = 3$) первого порядка ($a = 01$) была сформирована идеальным оператором усреднения по времени ($s = 2$) массива $\{*\}$ данных, полученных на различных ($J = 1$) временных интервалах одной и той же совокупности реализаций в каждом эксперименте.

Применение данного классификатора позволяет формализовать алгоритм идентификации задач статистических измерений для внешнего проектирования систем обработки экспериментальных данных при меньшем числе классов X случайных процессов (4 класса вместо 7) по сравнению с $X - \Theta - S - J$ — классификатором [12], даже при введении ограничений: $a \leq 5$ и $b \leq 10$, чего достаточно для практических приложений, т.к. в общепринятой классификации [4; 12] случайных процессов значения идентификаторов J и S более 3 теоретически невозможны. Построение классификатора может позволить увеличить число типовых задач статистических измерений за счет большей их дифференциации путём введения новых дополнительных идентификаторов — вправо после точки идентификатора "b". Предлагаемый классификатор статистических измерительных задач позволяет на этапе проектирования статистических СОЭД формализовать процедуру анализа порядка 30 тыс. задач ($JSTX = 144$ и $ab = 300$ при практически используемом $a \leq 5$). Приведенное выше ориентировочное число типовых статистических измерительных задач учитывает ограничения на практическое существование возможности анализа только стационарных эргодических процессов ($X = 1$), для которых, $\Theta_{cp} = \Theta_i = \Theta_k = \Theta_{kt}$, согласно [12], оценки будут НСМ во всех 9 случаях ($SJ = 9$). Для других случайных процессов могут быть использованы различные методы их стационаризации [10]. Однако имеются основания полагать, что несмещенные оценки могут быть получены и для других случаев при нетрадиционных стохастических цифровых обработках сигналов. Даже с учетом этих ограничений (т.е. при значениях $J = S = 3$, $T = 4$, $X = 4$, $a = 3$ и $b = 10$) возможен анализ около 3 тыс. задач на этапе внешнего проектирования статистических СОЭД, что значительно больше 153 задач, приведенных в [12].

На практике наиболее важным всегда является признак "X" — класс процесса, выяснению чего и посвящено основное содержание большинства работ по статистической радиотехнике [2; 4; 7; 10; 11; 12; 14], гидроакустике [1; 6], оптике [13; 14], при обработке результатов измерения параметров шероховатости в машиностроении [15] и др. В большинстве этих приложений сведения о классе процесса чаще всего могут быть получены только после проведения весьма трудоёмких и

дорогостоящих экспериментов или в результате ”косвенных” обработок по специальным алгоритмам результатов других экспериментов, непосредственно не связанных с данной конкретной задачей. Такая постановка задачи отражает общие тенденции по разработке методов анализа случайных процессов и принципов работы статистических СОЭД при измерении оценок характеристик физических процессов [15].

Использование классификатора в системе инженерных анализов и расчетов — CAE (Computer Aided Engineering) на этапе внешнего проектирования статистических СОЭД упрощает разработку технического задания для их внутреннего проектирования с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР) — CAD (Computer Aided Design) и изготовления в системах компьютеризированных интегрированных производств — CIM (Computer Integrated Manufacturing), а также даёт возможность превращения автономных CAD, CAM и CAE-систем в интегрированную CAE/CAD/CAM-систему.

Вывод. Предлагаемый классификатор может позволяет формализовать значительное число задач статистических измерений на этапе внешнего проектирования, являющегося научной основой для создания аналоговых и аналого-цифровых систем обработки экспериментальных данных и сократить время проектирования.

Алгоритм идентификации задач статистических измерений с помощью предлагаемого классификатора может найти применение и в современных PLM-технологиях (Product Lifecycle Management), характеризующих развитием в направлении, называемом GCE (Global Collaborative Environment — Глобальное коллективное окружение). GCE на базе новых информационных технологий, поддерживающих концепцию полного электронного описания объекта — EPD (Electronic Product Definition) с использованием классификатора может сократить время производства различных систем обработки экспериментальных данных, особенно уникальных, и осуществлять их сопровождение на всех этапах жизненного цикла.

Список использованной литературы:

1. Бобер Р. Гидроакустические измерения / Р. Бобер ; пер. с англ. — М., 1974. — 354 с.
2. Воллернер Н. Ф. Аппаратурный спектральный анализ сигналов / Н. Ф. Воллернер. — М. : Советское радио, 1977. — 207 с.
3. Глушков В. М. Введение в АСУ / В. М. Глушков. — К. : Техника, 1972. — 312 с.
4. Гуткин Л. С. Теория оптимальных методов радиоприема при флюктуационных помехах / Л. С. Гуткин. — М. : Советское радио, 1972. — 448 с.
5. Каптюг А. А. Аксиоматика для адаптивной процедуры построения показателя эффективности измерительных систем / А. А. Каптюг // Труды У

- Всесоюзной школы-семинара по статистической гидроакустике (СГ-5). — Новосибирск, 1975. — С. 356–367.
6. Куликов Е. И. Вопросы оценок параметров сигналов при наличии помех / Е. И. Куликов. — М. : Советское радио, 1969. — 244 с.
 7. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ негауссовых процессов и их преобразование / А. Н. Малахов. — М. : Советское радио, 1978 — 376 с.
 8. Мирошниченко В. С. Уменьшение погрешности вычисления на ЭВМ длительностей выбросов случайных процессов над порогом / В. С. Мирошниченко, Н. Д. Москанов // Тез. докл. IV Всесоюзной конференции по аналоговой и аналого-цифровой технике. — М., 1973.
 9. Пономаренко В. К. Выбор параметров измерителей числовых характеристик случайных процессов / В. К. Пономаренко, В. С. Мирошниченко // Изв. ВУЗ СССР, разд. Радиоэлектроника. — 1971. — Т. XVI. — С. 7.
 10. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. — М. : Радио и связь, 1982.
 11. Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов / В. И. Тихонов. — М. : Наука, 1970. — 392 с.
 12. Цветков Э. И. Основы теории статистических измерений / Э. И. Цветков. — 2-ое изд. перераб. и дополн. — Л. : Энергоатомиздат, 1984. — 286 с.
 13. Юу Ф. Т. С. Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию / Ф. Т. С. Юу. — М. : Советское радио, 1979. — 304 с.
 14. Cutrona L., Porcello L., Vivian W. On the application of coherent optical processing techniques to the synthetic aperture radar / L. Cutrona, L. Porcello, W. Vivian // Proc. IEEE. — 1966. — Vol. 54.
 15. Detling V. S. Information-logical model error of random statistical characteristics measurements / V. S. Detling, C. Kartunov, I. V. Miroshnichenko // International scientific conference, Gabrovo, 23–24 Nov. 2007. — P. 322–327.

Propose an algorithm to identify the problems of statistical measurements for external system design stage of data processing. The algorithm can be used in new information technologies in the formation of the mathematical models of the subject areas and the development of algorithms and programs.

Key words: *application domain, random process, the classifier measurement problems, the main and additional identifiers, accuracy of the classification, statistical measurements, information technology.*

Отримано: 03.10.2012