

сообщения
Объединенного
Института
Ядерных
Исследований
Дубна

P13-85-657

Я. Китовски, Ю. Н. Пепельшев

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА ИБР-2

1985

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для диагностики сложных систем, таких, как ядерный реактор, стали использоваться различные методы распознавания образов ^{1-3/}. Эти методы позволяют найти неизвестные ранее корреляции в множестве экспериментальных данных, а также изучить топологическую структуру экспериментальных данных в многомерной системе координат. Структурой обычно называется набор образов, каждый из которых понимается как n -мерный вектор или точка в n -мерном евклидовом пространстве /для действительных координат векторов/

$$\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad //$$

Координаты образа /1/ выбираются так, чтобы они "хорошо" отражали состояние работы реактора. Выбор координат существенно зависит от цели обработки и от типа поставленной задачи. В любом случае, если исследуемый процесс обеспечивает представление исходных данных в виде выражения /1/, и последние группируются в классы /кластеры/ образов, то указанное свойство процесса можно использовать для диагностики состояния реактора.

Точки одного кластера обладают некоторыми общими характеристиками, по которым их можно отличить от точек других кластеров, и, наоборот, у точек, принадлежащих разным кластерам, есть черты, затрудняющие разделение образов. Исследование кластеров позволяет найти образы, отображающие нормальные условия работы реактора, и образы, характерные для различных отклонений от этого режима. В решении этой задачи может быть и иной подход: зная кластеры нормального и "ненормального" режимов работы реактора /кластеры разного типа/, можно определить, к какому кластеру принадлежит текущий образ, т.е. диагностировать текущее состояние реактора.

В данной работе решается первая задача, а именно: на основе некоторого множества образов, характеризующих различные режимы работы реактора ИБР-2, требуется выделить неизвестные классы образов по неизвестным инвариантным признакам. В решении этой задачи используется эвристический подход к методу распознавания образов, основанный на алгоритме ISODATA ^{/2/}.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе координатами образов, отражающих состояние реактора ИБР-2, являются амплитуды нормированной спектральной плотности флуктуаций энергии импульсов мощности $x_i = S_W(f_i) / \sigma_W^2$ и амплитуды нормированной спектральной плотности поперечных колебаний основного подвижного отражателя /ОПО/ $x_i = S_X(f_i) / \sigma_X^2$, $i = \overline{1, 257}$. Здесь $S_W(f_i)$ и $S_X(f_i)$ - оценки спектральных плотностей флуктуаций мощности и колебаний ОПО, σ_W^2 , σ_X^2 - соответствующие значения дисперсий. Сравнение образов осуществляется на основе сопоставления инвариантных характеристик, отражающих устойчивые связи во внутренней структуре /форме/ спектров S_W и S_X . Спектральные плотности были получены из обработки двухкомпонентных временных рядов, измеренных на ЭВМ PDP-11/20^{8/}. Каждый временной ряд был представлен 8192 парами последовательных значений энергии импульсов мощности Q и осевых отклонений ОПО. Величина Q измерялась с помощью ионизационной или вакуумной камеры деления. Измерения проводились при частоте повторения вспышек мощности, равной 5 1/с.

Состояние реактора в отдельных измерениях отличалось уровнем средней мощности \bar{W} , суммарным расходом теплоносителя через активную зону G , а также временем проведения измерения. Спектральная обработка временных рядов основывалась на алгоритме Кули-Тьюки с применением окна данных Кайзера-Бесселя^{7/}. Относительное стандартное отклонение спектральных оценок S_W и S_X составляло ~18% при разрешающей способности $\Delta f = 0,023$ Гц / Δf взята на уровне 6 db спектрального окна/. Для последую-

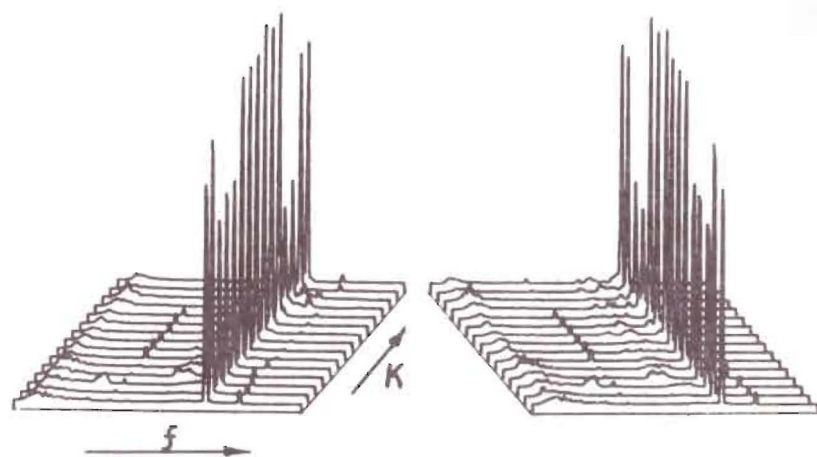


Рис.1. Нормированные спектральные плотности флуктуаций энергии импульсов мощности S_W /2-й набор данных/. f - частота, K - номер спектра.

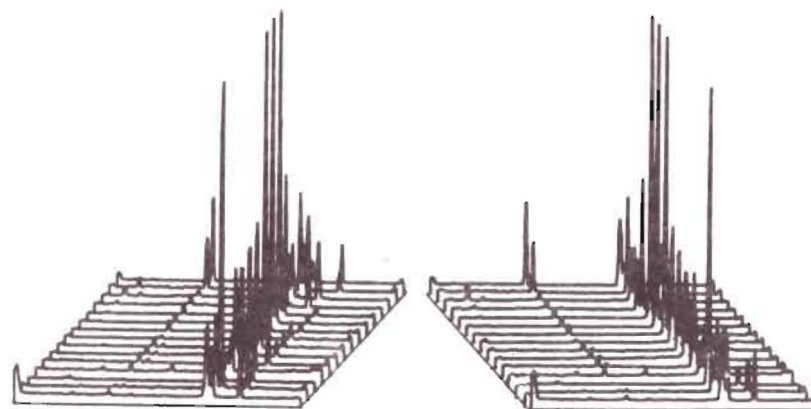


Рис.2. Нормированные спектральные плотности поперечных колебаний ОПО S_X /3-й набор данных/.

щей обработки были взяты три набора данных, по 15 спектров в каждом. Некоторые характеристики исходных данных представлены в табл.1. На рис.1 и 2 для сравнения показана форма спектров S_W и S_X для 2-го и 3-го наборов. В приложении 1 описывается метод распознавания образов, используемый в этой работе. Метод основан на эвристическом алгоритме ISODATA^{2,5/} /итеративный самоорганизующийся метод анализа данных/. В алгоритм включен иерархический метод кластеризации^{4/}.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И ИХ АНАЛИЗ

Эвристический подход, введенный в ISODATA, позволяет провести как общий, так и достаточно подробный анализ физических данных. В табл.2 показаны некоторые результаты расчетов /число кластеров и номера образов, принадлежащих кластерам/ при различном задании основных параметров алгоритма. Анализируя данные табл.2, можно отметить, что увеличение числа кластеров улучшает процесс правильной кластеризации. Из сравнения с табл.1 видно, что при анализе мощности /1-й и 2-й наборы данных/ с увеличением числа кластеров с 5-6 до 7-8 образы группируются согласно своим физическим особенностям (σ_W / \bar{W} , $\Delta W_m / \bar{W}$). /например, кластеры 2,4,5 и 8 из 1-го набора данных и кластеры 2 ÷ 6 из 2-го набора данных/. Нужно отметить, что легко выделяющийся кластер 1 с точкой 12 /1-й набор/ представляет собой другой физический процесс /колебания ОПО/, введенный в 1-й набор данных для контроля и проверки алгоритма ISODATA. Видно также, что есть кластеры, существенно удаленные от других. К таким

Таблица 1

Некоторые численные характеристики шумовых образов реактора ИБР-2, полученных в разное время для различных состояний реактора: σ_w , ΔW_m - стандартное отклонение и соответственно размах колебаний энергии импульсов мощности, σ_x , ΔX_m - соответствующие величины для осевых колебаний ОПО, \bar{W} - средняя мощность реактора, σ - расход натрия через активную зону.

№	W, МВт	G, м ³ /ч	I-й набор данных		2-й набор данных		3-й набор данных		Sx	
			DATA	$\bar{\sigma}_w/\bar{w}$	$\Delta W_m/\bar{w}$	$\bar{\sigma}_w/\bar{w}$	$\Delta W_m/\bar{w}$	DATA	$\bar{\sigma}_x$, мм	ΔX_m , мм
1	1,0	80	1,12,83	2,99	21,6	2,99	21,6	1,12,83	0,0054	0,037
2	1,0	80	19,01,84	2,90	20,1	2,90	20,1	19,01,84	0,0042	0,035
3	1,0	80	1,03,84	2,87	-	2,87	-	1,03,84	0,01	0,060
4	1,25	80	31,03,84	3,07	20,0	3,07	20,0	31,03,84	0,0037	0,033
5	1,50	80	3,04,84	3,55	24,0	3,55	24,0	3,04,84	0,0044	0,030
6	1,75	80	5,04,84	4,12	23,8	4,12	23,8	5,04,84	0,0047	0,036
7	1,75	80	5,04,84	4,0	24,4	4,0	24,4	5,04,84	0,0048	0,040
8	1,75	80	5,04,84	4,1	25,8	4,1	25,8	5,04,84	0,0049	0,036
9	1,8	84	13,04,84	5,27	34,2	6,80	39,0	29,05,84	0,0072	0,047
10	1,8	84	29,05,84	6,8	39,0	6,81	41,2	29,05,84	0,0074	0,045
11	1,8	84	29,05,84	6,75	42,8	6,87	42,7	29,05,84	0,0076	0,045
12	2,0	90	18,06,84	-	-	3,97	28,7	18,06,84	0,0070	0,065
13	2,0	90	18,06,84	3,97	28,7	3,92	30,4	18,06,84	0,0061	0,056
14	2,0	90	18,06,84	4,17	30,3	5,23	35,8	21,06,84	0,0065	0,047
15	2,0	90	21,06,84	5,07	32,9	5,02	34,1	21,06,84	0,0073	0,047

Таблица 2

Число кластеров и распределение образов в кластерах в зависимости от основных параметров алгоритма ISODATA

Параметры ISODATA	Структура кластеров		
	1. Набор данных S_w	2. Набор данных S_w	3. Набор данных S_x
1. $\theta_s = \theta_c = 10$ NCP = 8	1:3,4,5,I2,I3,I4,I5 2:1,2,6,7,8 3:9,I0,II	1:1,3,4,5,I2,I3,I4,I5 2:2,6,7,8 3:9,I0,II	1:1,2,4,I3 2:5,6,7,8,I2,I4,I5 3:3,9,I0,II
2. $\theta_s = \theta_c = 5$ NCP = 8	1:I2 2:2,6,7,8 3:9,I0,II 4:I3,I4 5:1,3,4,5,I5	1:1,3,4,5,I4,I5 2:2,6,7,8 3:9,I0,II 4:I2,I3	1:1,2,4,I3 2:5,6,7,8,I2,I4,I5 3:3 4:9,I0,II
3. $\theta_s = \theta_c = 1$ NCP = 8	1:I2 2:2,6,7,8 3:9,I0,II 4:I3,I4 5:I,I5 6:3,4,5	1:I,I4,I5 2:2,6,7,8 3:9,I0,II 4:I2,I3 5:3,4,5	1:I 2:I4,I5 3:3 4:2,4,I3 5:I2 6:9,I0,II 7:6,7,8 8:5
4. $\theta_s = \theta_c = 1$ NCP = 12	1:I2 2:6,7,8 3:I0 4:I3,I4 5:I,I5 6:2 7:9,II 8:3,4,5	1:I 2:6,7,8 3:9,I0,II 4:I2,I3 5:3,4,5 6:I4,I5 7:2	1:I 2:I5 3:3 4:2,4,I3 5:I2 6:I4 7:9,I0,II 8:6,7,8 9:5

Примечание: В структуре кластеров указан номер кластера и номера образов, входящих в данный кластер. Номера образов соответствуют обозначению, принятому в табл. 1. Звездочкой обозначены наилучшие варианты кластеризации.

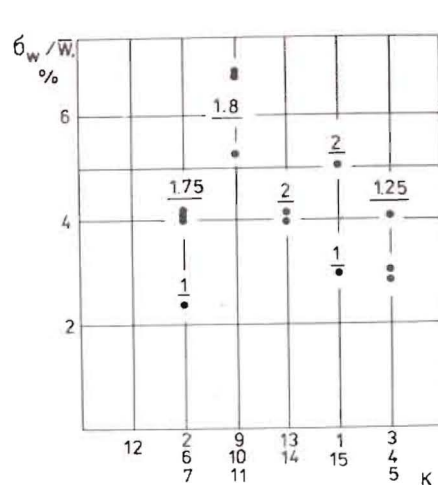


Рис.3. Распределение образов S_w по кластерам (К) для 1-го набора данных в зависимости от относительного стандартного отклонения колебаний мощности σ_w/\bar{W} . Цифрами на рисунке отмечены значения средней мощности \bar{W} /МВт/.

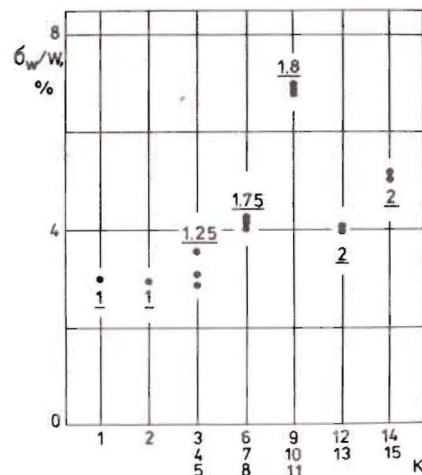


Рис.4. Распределение образов S_w по кластерам (К) для 2-го набора данных в зависимости от относительного стандартного отклонения колебаний мощности σ_w/\bar{W} . Цифрами на рисунке отмечены значения средней мощности \bar{W} /МВт/.

принадлежат, например, кластер 3 /в 1-м и 2-м наборах/, а также кластер 4 - они хорошо выделяются и при малом числе кластеров. Этот результат совпадает с анализом данных табл.1.

Сопоставляя результаты кластеризации 3-го набора данных /колебания ОПО/ с физическими параметрами /табл.1/, можно отметить, что они, в принципе, соответствуют данным табл.1, а также в основном совпадают с результатами кластеризации для мощности, хотя число кластеров для трех наборов данных получается различным. Несмотря на это, некоторые хорошо группирующиеся данные правильно классифицированы /особенно точки 9,10,11 и 6;7,8/. В целом для приведенных данных оптимальное число кластеров составляет 6-7. На рис.3-5 приведены распределения образов по кластерам в зависимости от величины одной из физических характеристик, соответствующей каждому образу - стандартному отклонению измеренных колебаний σ . Из рис.4-6 видно, что существует определенная связь между уровнем дисперсии, средней мощностью реактора \bar{W} и характером кластеризации, что особенно заметно для двух кластеров с образами 6,7,8 и 9,10,11. Отсюда следует, что форма спектральной плотности флуктуаций мощности и колебаний ОПО зависит от \bar{W} и от σ , т.е. может служить одним из критериев отбора спектров для их последующей классификации.

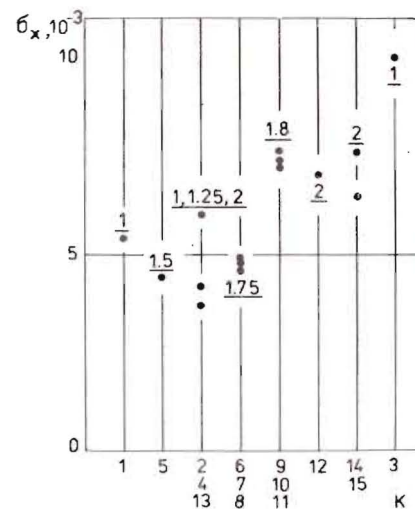
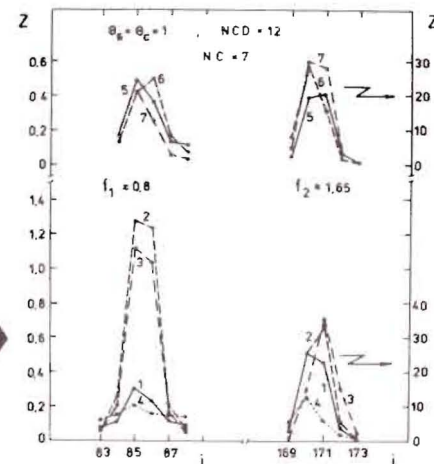


Рис.6. Координаты центров кластеров Z для 2-го набора данных /для S_w / в области спектральных пиков на частотах 0,8 и 1,65 Гц в зависимости от порядкового номера координаты i.

Рис.5. Распределение образов по кластерам (К) для 3-го набора данных /колебания ОПО/ в зависимости от стандартного отклонения колебаний ОПО σ_x /мм./ . Цифрами на рисунке отмечены значения средней мощности \bar{W} /МВт/.



Например, точка 3, отдельно выделенная в кластер 3 в колебаниях ОПО, существенно отличается от других по уровню дисперсии и отображает anomalous колебания ОПО.

С другой стороны, точки 1,2 во 2-м наборе данных /для мощности/ практически совпадают по значениям σ_w и \bar{W} , но разделяются в разные кластеры /кластеры 1 и 7/. Это указывает на то, что форма спектров флуктуаций мощности реактора определяется не только величиной σ_w и \bar{W} , но требуют учета и других наиболее информативных параметров. Поэтому в дальнейшей работе по классификации "стандартных" наборов образов реактора ИБР-2 необходимо учитывать все доминантные ядерно-физические и технологические параметры реактора. Например, координаты образов, соответствующие частотам 0,8 и 1,63 Гц, для всех трех наборов данных взаимозависимы и определяются доминирующими колебаниями подвижного отражателя на этих частотах.

На рис.6 приведены координаты центров кластеров для 2-го набора данных в области спектральных пиков 0,8 и 1,63 Гц. Из рис.6 видно, что все доминирующие координаты кластеров достаточно хорошо разделяются, хотя номер максимального значения координаты меняется от одного центра к другому. Этот факт отражает изменение положения спектральных пиков 0,8 и 1,63 Гц в коле-

баниях ОПО и \bar{W} , т.е. может быть использован для более подробного анализа работы ПО.

Из анализа спектров /см.рис.1-2/ следует, что на распознавание образов влияют не только максимальные координаты, но и полное число координат. В целом принятое в данной работе 257-мерное пространство образов является достаточно подробным для данной задачи распознавания и позволяет, используя отдельные наиболее информативные области координат, провести анализ с большим набором данных.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Использование метода распознавания образов при исследовании реактора ИБР-2 показало:

1. Спектральная структура шумов мощности и вибраций подвижного отражателя /ПО/ зависит от уровня средней мощности реактора и от величины дисперсии шумов в этих процессах.

2. В диапазоне средней мощности реактора 1-2 МВт выделяются однотипные спектральные структуры, соответствующие определенному значению средней мощности и суммарному расходу теплоносителя через активную зону.

3. Для некоторых структур в колебаниях ОПО и мощности установлена связь с аномальным уровнем дисперсии.

4. Использование метода распознавания образов позволяет осуществить классификацию основных режимов работы реактора на основании анализа шумов мощности и поперечных колебаний подвижных отражателей.

ПРИЛОЖЕНИЕ. АЛГОРИТМ ISODATA

При работе с набором образов /каждый в виде /1//:

$$\{X_1, X_2, \dots, X_N\}, \quad N = 15, \quad /2/$$

составленным из N элементов, алгоритм ISODATA выполняет следующие основные шаги:

Шаг 1. Задаются параметры, определяющие процесс кластеризации:

NCD - необходимое число кластеров,

NC - текущее число кластеров,

Q_N - параметр, с которым сравнивается количество выборочных образов, вошедших в кластер,

Q_s - параметр, характеризующий среднеквадратичное отклонение,

Q_c - параметр, характеризующий компактность,

L_m - максимальное количество пар-центров кластеров, которые можно объединить,

I_m - допустимое число циклов итерации,

τ_{k1} - параметр, уточняющий отделение образов,

G_{AM} - параметр, который употребляется при расщеплении кластера.

До выполнения следующих шагов алгоритма следует задать набор NC исходных центров кластеров:

$$\{\vec{z}_1, \vec{z}_2, \dots, \vec{z}_j, \dots, \vec{z}_{NC}\}. \quad /3/$$

Этот набор может быть получен разными методами /4/. В программе принято: $i_c = N / (2 \cdot NC)$ и соответствующие исходные центры есть просто векторы из набора данных:

$$\vec{z}_1 = \vec{x}_{i_c}.$$

$$\vec{z}_2 = \vec{x}_{3i_c}.$$

$$\vec{z}_3 = \vec{x}_{5i_c}. \quad /4/$$

.

.

.

В этом шаге предусмотрена возможность нормализации исходных данных для процесса кластеризации в интервале [0,1].

Шаг 2. Заданные N образов распределяются по кластерам в соответствии с выбранными исходными центрами. Для этой цели употребляется алгоритм КМЕАНЗ /4/, включающий следующие операции:

а/ определение расстояния образов от центров всех кластеров. Если образ не является ближайшим в своем текущем кластере, его принадлежность изменяется, рассчитывается новый центр кластера, к которому пришел образ, и новый центр кластера, который образ покинул;

б/ если в шаге 2а изменилось распределение образов между кластерами, он повторяется.

Получается распределение образов по S_j , $j = 1, \dots, NC$ кластерам и их новые центры, число образов j-кластера обозначается N_j .

Шаг 3. Ликвидируются подмножества образов, в состав которых входит менее θ_N элементов, т.е. если для некоторого j выполняется условие:

$$N_j < \theta_N, \quad /5/$$

то подмножество S_j исключается из рассмотрения, и значение NC уменьшается на 1:

$$NC \leftarrow NC - 1. \quad /6/$$

Если шаг 3 выполняется, осуществляется переход к шагу 2.

Шаг 4. В описываемой версии алгоритма распечатываются координаты центров кластеров.

Шаг 5. Вычисляется среднее расстояние \bar{D}_j между объектами, входящими в подмножество S_j , и соответствующим центром кластера:

$$\bar{D}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{\vec{x} \in S_j} \|\vec{x} - \vec{Z}_j\|, \quad j=1, \dots, NC. \quad /7/$$

$\|\cdot\|$ обозначает расстояние Евклида.

Шаг 6. Вычисляется обобщенное среднее расстояние между объектами, находящимися в отдельных кластерах, и соответствующими центрами кластеров:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{NC} N_j \cdot D_j. \quad /8/$$

Шаг 7. Если:

- а/ текущий цикл итерации последний - задержка алгоритма,
- б/ условие:

$$NC \ll NC \rho / 2 \quad /9/$$

выполняется, то переход к шагу 8;
в/ текущий цикл итерации четный или

$$NC > 2NC \rho \quad /10/$$

выполняется, то переход к шагу 11, в противном случае процесс итерации продолжается.

Шаг 8. Для каждого подмножества выборочных образов вычисляется вектор среднеквадратичного отклонения:

$$\vec{\sigma}_j = (\sigma_{1j}, \sigma_{2j}, \dots, \sigma_{nj})^T. \quad /11/$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N_j} \sum_{\vec{x} \in S_j} (x_{ik} - z_{ij})^2}, \quad j=1, \dots, NC, \quad i=1, \dots, n. \quad /12/$$

где n есть размерность образа, x_{ik} есть i -тая компонента k -того объекта в подмножестве S_j ; z_{ij} есть i -тая компонента вектора, представляющего центр кластера Z_j и N_j количество выборочных образов, включенных в S_j . Каждая компонента вектора $\vec{\sigma}_j$ характеризует среднеквадратичное отклонение образа из кластера S_j

го одной из осей координат. На этом шаге проверяется также выполнение:

$$|z_{ij} - x_{ik}| \leq r_{ki} \cdot \sigma_{ij}. \quad /13/$$

для всех $k=1, \dots, N$ объектов.

Процедура /13/ повторяется для всех $i=1, \dots, n$ координат и всех $j=1, \dots, NC$ подмножеств S_j . Если условие /13/ не выполняется, для любого k :

$$\vec{Z}_{NC+1} = \vec{X}_k, \quad /14/$$

$$NC \leftarrow NC + 1, \quad /15/$$

и алгоритм возвращается в шаг 2. В противном случае процесс итерации продолжается.

Шаг 9. В каждом векторе $\vec{\sigma}_j$, $j=1, \dots, NC$ выбирается максимальная компонента $\sigma_{j \max}$.

Шаг 10. Если для любого $\sigma_{j \max}$, $j=1, \dots, NC$ выполняются условия:

$$\sigma_{j \max} > \theta_s \quad /16/$$

и

$$а/ \bar{D}_j > \bar{D}, \quad N_j > 2(\theta_N + 1) \quad /17/$$

или

$$б/ NC \leq NC \rho / 2, \quad /18/$$

то кластер с центром Z_j расщепляется на два новых кластера с центрами Z_j^+ и Z_j^- . Кластер с центром Z_j ликвидируется, а

$$NC \leftarrow NC + 1, \quad /19/$$

Для определения центра Z_j^+ к компоненте вектора Z_j , соответствующей максимальной компоненте вектора $\sigma_{j \max}$, прибавляется:

$$y = G_{AM} \cdot \sigma_{j \max}, \quad 0 < G_{AM} \leq 1. \quad /20/$$

Центр кластера Z_j^- определяется вычитанием этой же величины из Z_j .

При выборе y следует руководствоваться в основном тем, чтобы величина y была достаточно большой для различения расстояний между образами, но достаточно малой, чтобы общая структура кластеризации существенно не изменилась.

Если расщепление происходит на этом шаге, надо перейти к шагу 2, в противном случае итерации продолжаются.

Шаг 11. Вычисляются расстояния D_{ij} между всеми парами центров кластеров:

$$D_{ij} = \| \vec{Z}_i - \vec{Z}_j \|, \quad i = 1, 2, \dots, NC - 1, \quad j = i + 1, \dots, NC. \quad /21/$$

Шаг 12. Расстояния D_{ij} сравниваются с параметром θ_c . Те L_{MAX} расстояний, которые оказались меньше θ_c , ранжируются в порядке возрастания:

$$\{ D_{i_1 j_1}, D_{i_2 j_2}, \dots, D_{i_L j_L} \}, \quad /22/$$

где

$$D_{i_1 j_1} \leq D_{i_2 j_2} \leq \dots \leq D_{i_L j_L}. \quad /23/$$

L_{MAX} - максимальное число пар кластеров, которые можно объединить.

Шаг 13. Процесс слияния кластеров. Каждое расстояние $D_{i_l j_l}$ вычислено для определенной пары кластеров между двумя центрами \vec{Z}_{i_l} и \vec{Z}_{j_l} . Кластеры S_{i_l} , S_{j_l} объединяются, причем новый центр

$$\vec{Z}_l^* = \frac{1}{N_{i_l} + N_{j_l}} [N_{i_l} \cdot \vec{Z}_{i_l} + N_{j_l} \cdot \vec{Z}_{j_l}]. \quad /24/$$

Центры \vec{Z}_{i_l} , \vec{Z}_{j_l} ликвидируются, и

$$NC \leftarrow NC - 1. \quad /25/$$

Процедура /24/; /25/ повторяется для $l = 1, 2, \dots, L_{MAX}$.

Шаг 14. Если цикл итераций последний, наступает прекращение алгоритма обработки. В противном случае расчеты переходят к шагу 2.

Циклом итераций считается каждый переход к шагу 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mogilner A.I., Skomorokhov A.O., Shvetsov D.M. Nucl. Technology, 1981, 53, p.8-18.
2. Gonzalez R.C., Fry D.N., Kryter R.C. IEEE Trans.on Nuclear Science, 1974, NS-21, 1, p.1-8.

3. Gonzalez R.C., Howington L.C. IEEE Trans.on Systems, Man and Cybernetics, 1977, SMC-7, 10, p.717-728.
4. Anderberg M.R. Cluster Analysis for Applications. Academic Press, New York, San Francisco, London, 1973.
5. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. "Мир", М., 1978.
6. Вагов В.А. и др. ОИЯИ, P13-82-533, Дубна, 1982.
7. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д. ОИЯИ, P13-84-73, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 сентября 1985 года