ЭМПИРИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ
(Вычислительные системы)
1978 год Выпуск 76

681.3.06:621.391

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ЛОГИЧЕСКИЕ РЕШАЮЩИЕ ПРАВИЛА

Г.С.Лбов, Ю.П.Макаров

Рассматривается задача динамического прогнозирования в следующей постановке. Пусть имеется N объектов, для описания которых используется n признаков $X = \{X_1, \dots, X_j, \dots, X_n\}$. В качестве целевого признака выбран некоторый признак X_0, замеренный в шкале наименований. У исследуемых объектов периодически через интервал времени Δt в R последовательных моментах времени $t_1, \dots, t_R$ замеряются значения признаков, входящих в X. Причем значение признака X_0 у исследуемых объектов в момент времени t_R будет $x_0^R = x_0^*$, а в предыдущие моменты $x_0^r \neq x_0^*$ $(r = 1, \dots, R-1)$. После каждого измерения получаем таблицу значений признаков $C^r = \{x_{ij}^r\}$, где $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, n$; $r = 1, \dots, R$. Временную последовательность таблиц $C^1, \dots, C^r, \dots, C^R$ будем называть обучающей выборкой.

Необходимо для $(N+1)$-го объекта на основе измерений, полученных в некоторые моменты времени $t^1, \dots, t^L$ (для них $x_0 \neq x_0^*$), определить промежуток времени ΔT от момента времени t^L до того момента, когда значение целевого признака станет равным x_0^*. При этом необходимо минимизировать число измерений L, требуемое для решения задачи.

Для определения величины ΔT используются выявленные закономерности изменения значений признаков $X_1, \dots, X_n$ у исследуемых объектов во времени. Предполагается, что эти закономерности проявляются на интервалах времени больших, чем интервал Δt между последовательными измерениями.

Поиск моделей прогнозирования ведется в классе логических решающих функций. Использование этого класса связано со следующими обстоятельствами:

а) значения признаков $X_1,\ldots,X_n$ замерены в шкалах различных типов;

б) число признаков, значения которых регистрируются в протоколах экспериментов, велико, причем признаки находятся в сложной зависимости друг от друга;

в) в экспериментальных данных имеются пропуски замеров значений ряда признаков у некоторых объектов.

Введем необходимые определения. Элементарными высказываниями считаются выражения следующего вида:

I) $X_j(a) = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \ldots$ для признаков, замеренных в шкале наименований (a – имя объекта, $x_1, x_2, x_3, \ldots$ – значения признака X_j);

2) $x_1 \le X_j(a) < x_2$ для признаков, замеренных в шкале порядка (x_1 и x_2 – некоторые значения признака X_j) или в шкалах отношений, интервалов ($[x_1, x_2)$ – некоторый интервал значений признака X_j);

3) $X_j(a) = x_1/t_r, t_{r+1}$ – "значение x_1 сохраняется при переходе от момента времени t_r к моменту t_{r+1}";

4) $x_1 \le X_j(a) < x_2/t_r, t_{r+1}$ – "значение $X_j(a)$ сохраняется в интервале $[x_1, x_2)$ при переходе от момента времени t_r к моменту t_{r+1}".

Необходимо отметить, что в работе [4] для распознавания, в отличие от используемых здесь временных изменений признаков, использовались признаки, значения которых отражали "пространственные" изменения значений исходной системы признаков.

Будем обозначать элементарное высказывание символом J, а его отрицание – символом $\bar{J}$.

Для определения элементарных высказываний типа 3) и 4) понадобится в дополнение к исходной последовательности таблиц $C^1,\ldots, C^R$ последовательность таблиц $\tilde{C}^1,\ldots,\tilde{C}^{R-1}$. В каждой таблице $\tilde{C}^r$ будет записана информация об изменениях значений признаков для всех объектов при переходе от момента t_r к моменту t_{r+1}. Назовем такие таблицы $\tilde{C}^r = (\Delta x^r_{ij})$ "таблицами-переходами" ($r = 1,\ldots, R-1$). Элементы этих таблиц определяются по следующему правилу.

Из таблиц C^r и C^{r+1} берутся элементы с индексами (i,j). Они соответствуют двум последовательным измерениям значений признака X_j у объекта с номером i.

Возможны случаи:

а) X_j – признак, замеренный в шкале наименований; в этом случае $\Delta x_{ij}^r = \begin{cases} * \\ x_{ij} \end{cases}$, где x_{ij} – значение признака, сохранившееся при переходе от t_r к t_{r+1}, $*$ – специальный символ, указывающий, что значение признака при переходе не сохранилось;

б) X_j – признак, замеренный в балльной шкале порядка; в этом случае $\Delta x_{ij}^r = \pm n$, где n – число градаций, на которое произошло увеличение (уменьшение) значения признака X_j у объекта с номером i при переходе от момента t_r к моменту t_{r+1};

в) X_j – признак, замеренный в шкалах отношений, интервалов или абсолютной шкале; в этом случае $\Delta x_{ij}^r = (x_{ij}^{r+1} - x_{ij}^r)$.

Введем для удобства изложения вспомогательную систему признаков $X' = \{X_1', \ldots, X_n'\}$. Значениями признака X_j' являются значения Δx_{ij}^r, образованные вышеописанным способом.

Необходимость введения последовательности "таблиц-переходов" $\{\widetilde{C}^r\}$ и системы признаков X' обусловлена следующими причинами. При обработке этих таблиц можно находить логические закономерности, представляющие собой конъюнкции из элементарных высказываний вида 3) – 4), которые выражают в явном виде динамику изменения значений признаков у исследуемых объектов при переходе от момента времени t_r к следующему моменту времени t_{r+1}. Введение системы признаков X' позволяет сформулировать элементарные высказывания вида 3) – 4) в форме высказываний вида I) – 2). Это дает возможность использовать для обнаружения элементарных высказываний как вида I) – 2), так и вида 3) – 4) методы обнаружения логических закономерностей, описанные в работах [I,2], применяя их к последовательностям таблиц $\{C^r\}$ и $\{\widetilde{C}^r\}$.

Метод анализа любой таблицы из последовательности $C^1, \ldots, C^R$ (либо из последовательности $\widetilde{C}^1, \ldots, \widetilde{C}^{R-1}$) один и тот же, поэтому рассмотрим его на примере анализа некоторой таблицы C^r. В результате применения этого метода будет выявлен соответствующий таблице C^r, измеренной в момент времени t_r, список закономерностей $\{S_k^r\}$ $(k = 1, \ldots, k_r)$. Закономерности, входящие в этот список, с одной стороны, характеризуют отличие таблицы C^r от таблиц C^1 и C^R $(r \neq 1,\ r = R)$, с другой стороны, характеризуют таблицу C^r с точки зрения критерия, введенного в работе [2].

Первые два вида закономерностей могут быть выявлены с помощью методов распознавания образов, описанных в [I,2]. При этом под закономерностью понимается логическое высказывание S, удовлетворяющее условиям: $\overline{P}_S^r \geq \delta$, $\overline{P}_S^1 \leq \beta$, где $\overline{P}_S^r$ и $\overline{P}_S^1$ – относительные частоты выполнения высказывания на объектах таблиц C^r и C^i ($i = 1,\dots,R$; $r \neq i$); β и δ – некоторые пороги. Чем больше разность $(\bar{P}_S^r - \bar{P}_S^i)$ для выделенной закономерности, тем больше разность $(P_S^r - P_S^i)$, где P_S^r и P_S^i – вероятности выполнения S на объектах в моменты времени t_r и t_i.

В третий тип закономерностей включаются те высказывания, которые удовлетворяют некоторому критерию группирования объектов таблицы C^r, подробно описанному в работе [2]. При этом могут использоваться процедуры перебора высказываний, предлагаемые в работах [I,2].

После обработки всех таблиц из обеих последовательностей полученные списки закономерностей упорядочиваются следующим образом. Начиная с первого, на всех нечетных местах располагаются списки закономерностей, соответствующие последовательности таблиц $\{C^r\}$. Всего таких списков R. Начиная со второго, на всех четных местах располагаются списки закономерностей, соответствующие последовательности таблиц $\{\tilde{C}^r\}$. Всего таких списков $R-1$. Перенумеруем упорядоченную таким образом последовательность списков закономерностей номерами от I до $2R-1$. Имеется последовательность $\{S_k^m\}$, где $m = 1,\dots,(2R-1)$; $k = 1,\dots,k_m$. На первом месте в последовательности расположен список закономерностей, содержащих информацию о значениях признаков у изучаемых объектов в момент времени t_1, на втором месте – список закономерностей, содержащих информацию об изучаемых объектах при переходе от момента времени t_1 к моменту t_2 и т.д.

Используя полученную упорядоченную последовательность списков закономерностей, можно сформировать динамические закономерности, которые будут содержать информацию о смене одних закономерностей другими с течением времени.

Под динамической закономерностью будем понимать упорядоченную последовательность из двух и более закономерностей, принадлежащих соседним спискам из последовательности $\{S_k^m\}$. Причем динамическая закономерность v (а следовательно, и все входящие в нее логические закономерности) должна быть истинной на значениях признаков определенной доли δ_1 от общего числа N объектов, т.е. $\bar{P}_v \geq \delta_1$.

Рассмотрим процедуру формирования динамических закономерностей. Для каждого объекта из обучающей выборки определяются логические закономерности из различных списков, входящих в последовательность $\{S_k^m\}$, которые истинны на значениях признаков этого объекта, и измеряемых в соответствующие моменты времени. После проверки истинности закономерностей из последовательности $\{S_k^m\}$ на всех изучаемых объектах выделяются искомые последовательности логических закономерностей, принадлежащих некоторым соседним спискам из $\{S_k^m\}$. Каждая закономерность, входящая в выделенную последовательность, истинна на значениях признаков, замеренных в соответствующие моменты времени, не менее чем у δ_1 объектов (δ_1 - доля от общего числа объектов).

Рассмотрим процедуру определения прогнозируемого интервала времени ΔT.

Пусть для этого потребуется L проведенных у изучаемого объекта a последовательно через Δt в моменты времени $t^1, t^2, \ldots, t^L$ измерений значений признаков исходной системы X.

Рассмотрим результаты измерения значений признаков у объекта a в момент времени t^1, т.е. $\{x_{aj}^1\}$. Полным перебором по всем спискам логических закономерностей определяются закономерности, истинные на значениях $\{x_{aj}^1\}$. При этом возможны следующие варианты.

I. На значениях $\{x_{aj}^1\}$ истинны одна или несколько закономерностей из списка с некоторым номером m. Тогда по номеру m можно установить таблицу C^r из обучающей выборки $\left(r = \left[\frac{m}{2}\right]\right)$, которой наиболее соответствуют значения признаков объекта a, измеренные в момент t^1, т.е. устанавливается соответствие момента времени t^1 и момента t_r. Теперь можно определить величину интервала $\Delta T = t_R - t_{\left[\frac{m}{2}\right]}$.

2. На значениях $\{x_{aj}^1\}$ истинны несколько закономерностей из списков с разными номерами. Задача прогнозирования интервала ΔT не может быть решена однозначно. В этом случае рассматриваем значения у объекта a, измеренные в следующий момент времени t^2, т.е. $\{x_{aj}^2\}$. Из множества динамических закономерностей выбираются те, в которые входят уже выделенные логические закономерности. Проверяем истинность на значениях $\{x_{aj}^2\}$ только тех логических закономерностей, которые входят в выбранные динамические закономерности и следуют за закономерностями, выделенными на первом этапе. Здесь возможны такие варианты:

а) на значениях $\{x^2_{aj}\}$ истинна одна из проверенных закономерностей, принадлежащая списку с некоторым номером m. Тем самым выделяется единственная динамическая закономерность, которая характеризует динамику изменения объекта a во времени. По номеру m устанавливается соответствие между моментами t^2 и t_r $\left(r=\left[\frac{m}{2}\right]\right)$ и находится прогнозируемый интервал времени ΔT;

б) на значениях $\{x^2_{aj}\}$ истинны несколько из проверенных закономерностей. В этом случае соответствующие им динамические закономерности в равной степени претендуют на прогнозирование динамики изменения объекта a. Для получения однозначного прогноза рассматриваются значения признаков объекта a, измеренные в момент времени t^3, т.е. $\{x^3_{aj}\}$. На них проверяется истинность логических закономерностей, входящих в оставшиеся динамические закономерности и следующих непосредственно за уже проверенными логическими закономерностями, и т.д.

Итогом решения является определение интервала времени прогнозирования ΔT или отказ от прогнозирования в случае отсутствия необходимой для этого динамической закономерности.

Полученные динамические закономерности позволяют решать дополнительную задачу динамического прогнозирования в следующей постановке. Используя набор предыдущих, проведенных последовательно через интервал Δt измерений признаков у объекта a, определить значение некоторого признака в будущий момент времени t^*.

Прогнозирование может быть осуществлено в пределах интервала времени, охватываемого имеющейся динамической закономерностью, позволяющей решать эту задачу. В качестве признака, значение которого требуется определить, может выступать как один из признаков $X_j \in X$, так и целевой признак X_0. Для удобства изложения прогнозируемый признак обозначим через z (вне зависимости от того, целевой это признак X_0 или один из признаков $X_j \in X$).

Для прогнозирования значения некоторого признака z необходимо на этапе формирования решающего правила выделить одну динамическую закономерность, которая претендует на прогнозирование динамики изменения значений признаков у исследуемого объекта. Это требование более строгое, так как даже одна логическая закономерность может участвовать одновременно в нескольких различных динамических закономерностях.

Для выделения динамической закономерности применяется процедура, аналогичная описанной выше процедуре формирования динамической закономерности. При этом на очередных результатах измерения значений признаков у объекта a проверяются в описанном порядке только те динамические закономерности, которые претендуют на прогнозирование динамики изменения объекта.

Пусть для определения динамической закономерности нам понадобилось l последовательных измерений значений признаков у исследуемого объекта. Пусть длина найденной динамической закономерности равна L (предполагаем, что $l < L$). Напомним, что динамическая закономерность содержит в своей последовательности как логические закономерности, имеющие отношение к некоторым моментам времени, так и логические закономерности, имеющие отношение к переходам от некоторых моментов времени к следующим. Поэтому, имея динамическую закономерность длины L, мы можем прогнозировать динамику изменения исследуемых объектов вперед на $\left[\frac{L}{2}\right]$ моментов времени. В нашем случае, после использования для выбора данной динамической закономерности l последовательных измерений, мы можем прогнозировать значение признака z у объекта вперед на $\left(\frac{L}{2} - l\right)$ моментов времени.

Для осуществления прогноза рассматривается группа изучаемых объектов, на которой истинны логические закономерности, входящие в полученную динамическую закономерность. Для этой группы объектов известны значения признака z в момент прогноза (t^*). Из этих значений образуется набор $z_{пр} = (z_1, \ldots, z_q)$, где q – количество объектов в рассматриваемой группе. Возможны три случая:

1) значения признака z замерены в шкале наименований; прогнозируемое значение $z(a)$ полагается равным тому значению, которое наиболее часто встречается в $z_{пр}$;

2) значения признака z замерены в шкале порядка; значение признака $z(a)$ прогнозируется в пределах набора значений, встретившихся в $z_{пр}$;

3) значения признака z замерены в шкалах интервалов, отношений или абсолютной шкале; значение признака $z(a)$ прогнозируется с точностью до интервала, образованного разбросом значений из $z_{пр}$.

Существует разновидность рассмотренной задачи динамического прогнозирования, отличие которой состоит в том, что в момент времени t_R целевой признак X_0 принимает два и более различных значений $x_0^1, x_0^2, \ldots, x_0^{k_0}$. Соответственно с этим рассматриваемые N объектов разделяются на k_0 классов. В этом случае при получении прогноза для нового объекта а решаются две задачи: определение интервала времени ΔT от момента t^L до момента t_R и определение принадлежности объекта а к одному из k_0 классов.

Первая задача решается вышеизложенным методом. При этом происходит анализ всей обучающей выборки вне зависимости от значений целевого признака X_0 у разных объектов в момент времени t_R. После определения интервала ΔT решается вторая задача, которая ставится как задача распознавания k_0 образов. Обучающей выборкой для ее решения служит таблица C^*, которую мы выбираем, имея t_R и ΔT. Замеры значений признаков у N объектов при этом разделяются на обучающие выборки k_0 классов.

Описанный алгоритм был реализован на языке ФОРТРАН-IУ. Программа ДИНАР включает в качестве блоков программы ТЭМП и КАРП, алгоритмы которых описаны в работах [2,5]. Для проверки правильности работы программы ДИНАР предложен тест, включающий последовательность из четырех таблиц C^1, C^2, C^3, C^4, замеры которых получены в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 (табл. I).

Таблица I

t_1			t_2			t_3			t_4		
x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
I	2	0.34	2	2	0.58	3	3	0.55	I	2	0.66
3	3	0.66	I	6	0.39	4	2	0.64	2	3	0.08
2	3	0.70	I	4	0.46	2	2	0.50	3	2	0.4I
2	2	0.40	2	2	0.49	I	6	0.76	I	4	0.79
I	3	0.86	2	2	0.44	3	3	0.60	2	2	0.52
I	6	0.I0	I	3	0.47	I	2	0.66	I	5	0.77
I	4	0.26	4	3	0.53	3	3	0.49	4	3	0.25
4	2	0.46	I	3	0.36	I	4	0.79	3	3	0.I0
3	5	0.92	4	5	0.90	4	5	0.08	I	6	0.92

Табл. I содержит измерения значений признаков X_1, X_2, X_3 у одних и тех же девяти объектов. При этом целевой признак X_0 у всех объектов принимает следующие значения $x_0(t_1) \neq x_0^*$, $x_0(t_2) \neq x_0^*$, $x_0(t_3) \neq x_0^*$, $x_0(t_4) = x_0^*$. Признаки X_1 и X_2 замерены в шкале наименований, признак X_3 – количественный. При анализе тестового материала было выделено пять динамических закономерностей v_1, v_2, v_3, v_4 и v_5 (табл. 2).

Таблица 2

	t_1	t_2	t_3	t_4
v_1		$(x_1 = I) \wedge (0{,}36 \le x_3 \le 0{,}58)$	$(0{,}49 \le x_3 \le 0{,}6)$	
v_2		$(x_1 = I) \wedge (0{,}36 \le x_3 \le 0{,}47)$	$(0{,}49 \le x_3 \le 0{,}6)$	
v_3	$(0{,}26 \le x_3 \le 0{,}46)$	$(0{,}47 \le x_3 \le 0{,}58)$	$(0{,}55 \le x_3 \le 0{,}76)$	
v_4	$(0{,}I \le x_3 \le 0{,}4)$	$(0{,}47 \le x_3 \le 0{,}58)$	$(0{,}55 \le x_3 \le 0{,}76)$	$(x_1 = I) \wedge (0.66 \le x_3 \le 0{,}92)$
v_5	$(0{,}I \le x_3 \le 0{,}4)$	$(0{,}47 \le x_3 \le 0{,}58)$	$(0{,}55 \le x_3 \le 0{,}66)$	

Все динамические закономерности выполняются не менее чем на четырех объектах. Заметим, что признак X_2 можно в дальнейшем исключить из рассмотрения как неинформативный, так как его значения не учитываются ни в одной из выделенных закономерностей.

Для иллюстрации рассмотрены два контрольных объекта. Для локализации во времени первого объекта a_1 понадобилось провести два последовательных измерения значений признаков X_1 и X_3. Пусть для t^1 $X_1(a_1)=1$, $X_3(a_1) = 0{,}39$; для t^2 $X_1(a_1)=1$, $X_3(a_1)=0{,}47$. В результате по двум измерениям устанавливаем соответствие времени замера значений признаков у объекта a_1 – t^2 и времени замера значений признаков у объектов из обучающей выборки t_2: $t^2 = t_2$. Это соответствие устанавливается совместно третьей, четвертой и пятой динамическими закономерностями.

Для локализации второго объекта a_2 понадобилось проведение трех последовательных измерений значений признаков X_1 и X_3. Пусть для t^1 $X_1(a_2)=1$, $X_3(a_2) = 0{,}41$; для t^2 $X_1(a_2)=1$, $X_3(a_2)=0{,}5$; для t^3 $X_1(a_2) = 1$, $X_3(a_2)=0{,}6$. В результате по третьей динамической закономерности установлено соответствие между t^3 и временем замера значений у объектов из обучающей выборки: $t^3 = t_3$.

Литература

1. ЛБОВ Г.С., КОТЮКОВ В.И., МАНОХИН А.Н. Об одном алгоритме распознавания в пространстве разнотипных признаков.–В кн.: Вычислительные системы. Вып. 55. Новосибирск, 1973, с. 108-110.

2. ЛБОВ Г.С., КОТЮКОВ В.И., МАШАРОВ Ю.П. Метод обнаружения логических закономерностей на эмпирических таблицах. – В кн.: Эмпирическое предсказание и распознавание образов. (Вычислительные системы, вып.67.) Новосибирск, 1976, с.29–41.

3. КЕНДАЛ М.Дж., СТЬЮАРТ А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. М., "Наука", 1976, т.3.

4. ЗАГОРУЙКО Н.Г., САМОХВАЛОВ К.Ф. Распознавание ситуаций по динамическим признакам (алгоритм ДИП). –В кн.: Вычислительные системы. Вып. 37. Новосибирск, 1969, с. 38–43.

5. ЛБОВ Г.С., МАШАРОВ Ю.П. Программа выбора логических закономерностей для распознавания образов в случае разнотипных признаков (программа ТЭМП). Методическое пособие. Новосибирск,1977 (НГУ).

6. ЛБОВ Г.С., МАШАРОВ Ю.П. Метод динамического прогнозирования, основанный на логических закономерностях. Институт математики СО АН СССР. Деп. в ВИНИТИ, № 1958-78 Деп., 1978.

Поступила в ред.-изд.отд.
10 июня 1978 года