

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ НА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

© 2022 И. В. Фурсов, В. А. Чертов

*Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия)*

*Решается задача разработки компьютерной технологии, позволяющей по заданному набору признаков, отнести пожароопасную ситуацию к одному из возможных классов: «норма», «опасная», «критическая» или «катастрофическая».*

*Ключевые слова: пожароопасная ситуация, идентификация, алгоритм, оперативность.*

**Формулировка задачи.** Пусть пожароопасные ситуации, возникающие на строительных объектах, характеризуется вектором нормированных значений признаков

$$\langle p_1(x_1), p_2(x_2), \dots, p_i(x_i), \dots, p_N(x_N) \rangle, \quad (1)$$

где  $p_i(x_i)$  – плотности распределения вероятности значений признаков  $x_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ).

Этими значениями могут быть показания датчиков задымленности, температуры, давления, концентрации взрывоопасных газов, влажности и др. <sup>1</sup>

На практике, как правило, используется нормальный закон распределения вероятностей  $p_i(x_i)$ , согласно которому

$$p_i(x_i) = \frac{1}{\sigma_i^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x_i - m_i)^2}{2\sigma_i^2} \right\}, \quad \text{где } m_i -$$

математическое ожидание признака  $x_i$ , а  $\sigma_i^2$  – среднее квадратичное отклонение.

Таким образом, для описания пожароопасных ситуаций будем использовать два вектора:

$$(m_1, \dots, m_N); (\sigma_1, \dots, \sigma_N), \quad (2)$$

характеризующих средние значения признаков и их отклонения от средних значений.

Все типы пожароопасных ситуаций разделим на классы: «норма», «опасная», «критическая» и «катастрофическая», а по каждому признаку  $x_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) зададим непересе-

кающиеся интервалы их изменения  $\Delta_i^k$  в соответствие с классами выделенных ситуаций  $k$ .

Задача заключается в разработке компьютерной технологии, позволяющей по заданному набору признаков, определить класс пожароопасной ситуации, синтезировать алгоритм ее реализации и оценить оперативность алгоритма.

### Основные теоретические положения.

Идентификацию ситуаций по каждому признаку  $x_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ) будем осуществлять, используя следующую формулу, позволяющую рассчитать вероятность попадания случайной величины в интервалы  $\Delta_i^k$ :

$$P_i^k = \int_{\Delta_i^k} p_i(x_i) dx_i; \quad (k = \overline{1, 4}; i = \overline{1, N}) \quad (3)$$

где  $P_i^k$  – вероятности того, что при заданном распределении плотностей вероятностей  $p_i(x_i)$  идентифицируемая ситуация по признаку  $x_i$  будет отнесена к нормальной ( $k = 1$ ), опасной ( $k = 2$ ), критической ( $k = 3$ ) или к катастрофической ( $k = 4$ ).

Для практического вычисления этих вероятностей удобно использовать формулу:

$$\begin{aligned} P_i^k &= P_i^k(a_i^k < x_i < b_i^k) = \\ &= \Phi\left(\frac{b_i^k - m_i}{\sigma_i}\right) - \Phi\left(\frac{a_i^k - m_i}{\sigma_i}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

Чертов Вячеслав Алексеевич – Воронежский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [cva.57@yandex.ru](mailto:cva.57@yandex.ru).

Фурсов Илья Вадимович – Воронежский государственный технический университет, аспирант.

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt$  – функция

Лапласа, вычисляемая по таблице;  $a_i^k, b_i^k$  – минимальные и максимальные значения интервалов  $\Delta_i^k$ .

В результате проведения расчетов получается матрица  $\|P_i^k\| (i = \overline{1, N}; k = \overline{1, 4})$ , компоненты которой характеризуют вероятность того, что по признаку  $x_i$  идентифицируемая ситуация относится к классу  $k$ , причем для всех  $k$  выполняется условие  $\sum_{i=1}^N P_i^k = 1$ .

Если по всем признакам  $x_i (i = \overline{1, N})$  максимумы  $P_i^k$  в матрице  $\|P_i^k\|$  соответствуют одному и тому же значению  $k$ , то задача идентификации решена, и принимается решение, что идентифицируемая пожароопасная ситуация относится к классу  $k$ .

В своем формальном выражении это условие выглядит следующим образом:

$$\forall_{k=1,4} \left( \exists_{i=1,N} (P_i^k \rightarrow \max_i) \right). \quad (5)$$

Однако, при этом могут возникнуть, так называемые не доопределённые ситуации, когда по одним признакам максимумы  $P_i^k$  соответствуют одним значениям  $k$ , а по другим признакам максимумы  $P_i^k$  соответствуют другим  $k$ . В этом случае условие (5) не выполняется и для более точной идентификации пожароопасных ситуаций необходимо использовать соответствующую меру [1].

В качестве такой меры предлагается использовать расстояние Махаланобиса [2], являющееся обобщением евклидова расстояния для вероятностных значений признаков идентификации, и определяемого для нашего случая следующим выражением:

$$\rho(x, a) = \sqrt{(m_x - m_a) COV_0^{-1} (m_x - m_a)^T}, \quad (6)$$

где

$$COV_0 = \frac{1}{2(N-1)} (COV_x + COV_a) - \text{объ-}$$

единенная ковариационная матрица;

$COV_0^{-1}$  – обратная объединенная ковариационная матрица;

$COV_x, COV_a$  – матрицы ковариаций признаков векторов  $x$  и  $a$ , представляющие собой квадратные симметрические неотрицательно определенные матрицы, на диагонали которых располагаются дисперсии компонент вектора, а внедиагональные элементы – ковариации между компонентами;

$m_a = (m_1^a, \dots, m_N^a)$  и  $m_x = (m_1^x, \dots, m_N^x)$  – средние значения признаков векторов  $x$  и  $a$ ;

$T$  – индекс транспонирования.

С учетом сказанного, вычисление рас-

стояния  $\rho(x, a)$  сводится к последовательному выполнению следующих операций: а) вычислить математические ожидания значений признаков точек классов; б) вычислить среднеквадратичные отклонения значений признаков точек классов; в) вычислить ковариации между всеми парами признаков точек классов, составить ковариационные матрицы и объединенную ковариационную матрицу; г) если объединенная ковариационная матрица обратима, то вычислить  $\rho(x, a)$  по формуле (4). Если эта матрица необратима, то вычислить расстояние по следующей формуле:

$$\rho(x, a) = \sqrt{(m_x - m_a) (COV_0 + E)^{-1} (m_x - m_a)^T}, \quad (7)$$

где  $E$  – единичная матрица того же размера, что и  $COV_0$ .

Пример вычислений с использованием Python 3.6 (библиотека numpy 1.19.5) дается ниже:

```
import numpy as np
def mahalanobis(point_from, point_to, inverse_covariance_matrix):
    delta = point_from - point_to
    return max(np.float64(0),
np.dot(np.dot(delta, inverse_covariance_matrix), delta)) ** 0.5
test_point = np.array([4., 2.])
class_ = np.array([[1., 1.], [2., 2.], [3., 3.], [4., 4.], [5., 5.]])
covariance_matrix = np.cov(class_,
rowvar=False, ddof=1)
```

```

inverse_covariance_matrix =
np.linalg.inv(covariance_matrix + np.identity(covariance_matrix.shape[0]))
print("Обратная ковариационная матрица:\n", inverse_covariance_matrix, sep="")
for point_to in [class_.mean(axis=0), *class_]:
print("d_E-M (" , test_point, " , " , point_to,
" , (COV+E)^(-1)) = ",
mahalanobis(test_point, point_to, inverse_covariance_matrix), sep="").

```

Далее, вместо признаков вектора  $a$  подставляем значения признаков, характерных для нормальной, опасной, критической и катастрофической ситуаций, и повторяем вычисления четыре раза. В результате получаем оценки близости идентифицируемой ситуации к классам «норма», «опасная», «критическая», «катастрофическая».

#### Описание алгоритма решения задачи.

Разработанный на основе приведенных выше теоретических положений, алгоритм идентификации пожароопасных ситуаций представлен на рисунке 1.

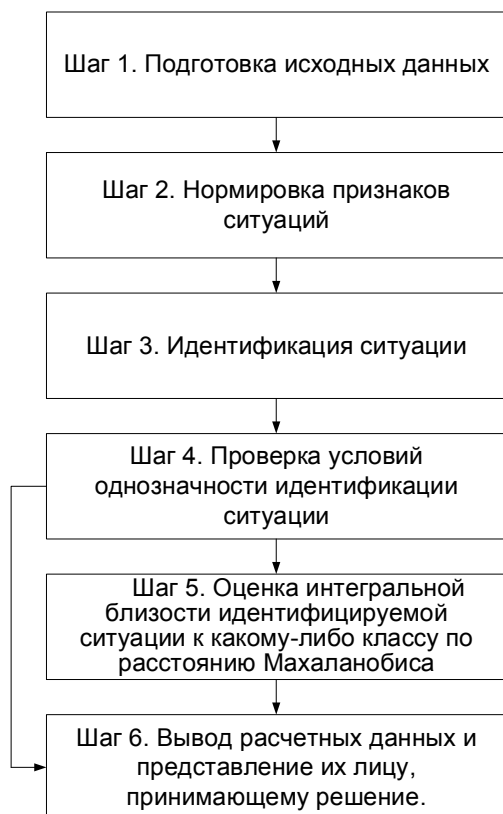


Рисунок 1. Алгоритм идентификации пожароопасных ситуаций

В соответствии с этим алгоритмом расчеты проводятся пошагово.

Шаг 1. Подготовка исходных данных. Формирование векторов (2), задание интервалов их изменения  $\Delta_i^k$  в соответствии с классами выделенных ситуаций.

Шаг 2. Нормировка признаков ситуаций по правилам:

$$x_i = \frac{\chi_i^{\max} - \chi_i}{\chi_i^{\max} - \chi_i^{\min}} \quad \text{— для признаков, ориентированных на максимум;}$$

$$x_i = \frac{\chi_i - \chi_i^{\min}}{\chi_i^{\max} - \chi_i^{\min}} \quad \text{— для признаков, ориентированных на минимум,}$$

ориентированных на минимум,

$\chi_i^{\max}, \chi_i^{\min}$  — максимально и минимально возможные значения измеряемых (ненормированных) признаков.

В результате этой операции получаем, что значения всех признаков находятся в интервале от нуля до единицы, причем, чем ближе значение данного признака к единице, тем выше уровень пожарной опасности по данному признаку.

Шаг 3. Идентификация ситуаций по каждому признаку  $x_i (i = \overline{1, N})$  с использованием формулы (4).

Шаг 4. Проверка условия однозначности идентификации ситуаций (5). Если это условие выполняется, то переход к шагу 6. В противном случае результаты идентификации признаются не однозначными и осуществляется переход к шагу 5.

Шаг 5. Оценка по формулам (6) или (7) интегральной близости идентифицируемой ситуации к норме, опасной, критической или катастрофической.

Шаг 6. Вывод данных и представление их лицу, принимающему решение. Пример выходного интерфейса представлен на рисунке 2.

#### Оценка оперативности алгоритма.

Суть вопроса заключается в следующем. Основным требованием к рассматриваемой компьютерной технологии является требование, чтобы время решения задачи идентификации пожароопасной ситуации  $T_R$  не превышало некоторой наперед заданной величины  $T^{KR}$ , то есть выполнялось условие:

$$T_R < T^{KR}. \quad (8)$$

КЛАСС СИТУАЦИИ	РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ	
	ВЕРОЯТНОСТЬ	УРОВЕНЬ БЛИЗОСТИ
НОРМА	0.1	0
ОПАСНАЯ	0.4	0.9
КРИТИЧЕСКАЯ	0.2	0
КАТАСТРОФИЧЕСКАЯ	0.3	0.1

Рисунок 2. Выходной интерфейс алгоритма идентификации пожароопасных ситуаций

В противном случае проведение каких-либо расчетов становится бессмысленным поскольку факт возгорания на объекте уже свершился, и надо принимать действенные меры, а не заниматься оценками.

Будем исходить из того, что величина  $T_R$  определяется, во-первых, временем работы собственно алгоритма идентификации  $T_A$  и, во-вторых, временем, потребным для набора статистических данных относительно признаков идентифицируемой ситуации  $T_S$  необходимых для работы алгоритма, то есть:

$$T_R = T_A + T_S \quad (9)$$

Введем следующие обозначения:

$N$  – количество признаков, по которым осуществляется идентификация пожароопасной ситуации;

$K^i (i = \overline{1, N})$  – объем выборки значений признаков, по которым осуществляется идентификация пожароопасной ситуации;

$T_i$  – время потребное для измерения текущего значения  $i$ -го признака пожароопасной ситуации.

Будем исходить из того, что процесс замера значений всех  $N$  признаков пожароопасной ситуации осуществляется параллельно. Тогда (9) можно записать в следующем виде:

$$T_R = T_A + \max_{i=1, N} (T_i \times K^i), \quad (10)$$

Из (10) видно, что при заданных величинах  $T_A, T_i, N$  время решения задачи идентификации пожароопасной ситуации определяется объемом выборки значений признаков,

по которому осуществляется ее идентификация.

Таким образом задача определения требований к оперативности процесса идентификации пожароопасных ситуаций фактически сводится к статистической задаче определения минимально необходимого объема выборки значений признаков.

Следуя [3,4], и в предположении нормального закона распределения величин признаков, для решения этой задачи необходимо задать:

1) среднеквадратическое отклонение измеряемых параметров от своих средних значений -  $S_z$ ;

2) необходимую точность оценки –  $\varepsilon$ ;

3) доверительную вероятность  $p$  (обычно  $p = 0,95$ );

Далее, используя таблицу интегральной функции Лапласа определяем значение величины  $t$ , а затем по формуле

$$K_i = \frac{t^2 \cdot S_z^2}{\varepsilon^2} \quad (11)$$

рассчитываем минимально необходимый объем выборки для каждого параметра  $x_i (i = \overline{1, N})$ , при котором обеспечивается требуемая точность оценки с заданной доверительной вероятностью.

Пример расчета. Имеется газовый отопительный котел высокого давления и известно, что при температуре воды более  $100C^0$  может произойти разрыв котла и возникнуть пожароопасная ситуация. Для определения текущей температуры воды используется электронный датчик, который раз в секунду измеряет температуру воды. Предварительно установлено, что среднее квадратичное отклонение температуры составляет  $10C^0$ , время работы алгоритма идентификации составляет 10с, а критическое время на принятие решения о типе пожароопасной ситуации – 60с. Требуется установить выполнимость критерия оперативности (8).

Решение. Вначале определяем минимальное количество замеров температуры  $K$ , при котором с вероятностью 0,95 обеспечивается отклонение оценки от истинной средней температуры на величину не более  $3C^0$ . Для этого по таблице интегральной функции Лапласа находим значение аргумента  $t$  при  $p$

= 0,95. Получается  $t = 1,96$ . Далее, пользуясь (11), рассчитываем величину  $K$ :

$$K = \frac{1,96^2 \cdot 10^2}{3^2} \approx 43.$$

Затем рассчитываем время, потребное для решения задачи идентификации пожароопасной ситуации:  $T_R = 10c + 43c \cdot 1 = 53c$ .

Далее сравниваем полученную величину с критическим значением  $T^{KR} = 60c$ . Оказалось, что  $T_R < T^{KR}$ . Следовательно, можно сделать вывод о том, что данная компьютерная технология удовлетворяет требованию оперативности и при этом с вероятностью 0,95 обеспечивает достоверность идентификации пожароопасной ситуации.

**Выводы.** В статье на базе логико-статистического подхода решается задача разработки компьютерной технологии, позволяющей по заданному набору признаков, отнести пожароопасную ситуацию к одному из возможных классов: «норма», «опасная», «критическая» или «катастрофическая». При этом в качестве меры близости ситуаций используется расстояние Махаланобиса.

Основное преимущество данной технологии перед аналогичными инструментами, используемыми в существующих автоматизированных системах противопожарной сигнализации, заключается в том, что в ней пороговая фиксация показаний противопожар-

ных датчиков дополняется замерами расстояния между ядрами классов и ядром идентифицируемой ситуации. Это позволяет повысить точность идентификации и практически исключить ложные срабатывания сигнальных устройств. учитывается вероятностный характер признаков идентификации ситуаций, Технология доведена до программной реализации с использованием высокоуровневого языка программирования Python и может найти применение в муниципальных противопожарных службах, а также в автоматизированных системах противопожарной сигнализации, устанавливаемых на строительных объектах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мандель И. Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика. 1988. – 340 с.
2. Амелькин С. А. Обобщенное расстояние Евклида-Махаланобиса и его свойства / С. А. Амелькин // Информационные технологии и вычислительные системы. – № 4. – 2006. – С. 40-44.
3. Архипова Н. И., Кульба В. В. Управление в чрезвычайных ситуациях / Н. И. Архипова, В. В. Кульба. – М.: РГГУ. 2008. – 480 с.
4. Мониторинг и методы контроля окружающей среды / Ю. А. Афанасьев [и др.] – М.: МНЭПУ, 2001. – 357 с.

## COMPUTER TECHNOLOGY FOR IDENTIFICATION OF FIRE-HAZARDOUS SITUATIONS AT CONSTRUCTION SITES

© 2022 I. V. Fursov, V. A. Chertov

*Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)*

*The problem of developing a computer technology that allows, according to a given set of signs, to attribute a fire-hazardous situation to one of the possible classes is solved: "normal", "dangerous", "critical" or "catastrophic".*

*Keywords: fire-hazardous situation, identification, algorithm, efficiency.*