

11. Solovyeva E. Types of recurrent neural networks for non-linear dynamic system modeling, *Proceedings of 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM2017)*. St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI». Russia, St. Petersburg, May 24–26, 2017, pp. 1-4.
12. Wang, Z., Yan, W., Oates, T. Time series classification from scratch with deep neural networks: A strong baseline, *In: 2017 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN, IEEE, 2017*, pp. 1578-1585.
13. Kate R.J. Using dynamic time warping distances as features for improved timeseries classification, *Data Min. Knowl. Discov.*, 2016, 30 (2), pp. 283-312.
14. Peng Y., Kondo N., Fujiura T., Suzuki T., Ouma S., Yoshioka H., Itoyama E., et al. Dam behavior patterns in Japanese black beef cattle prior to calving: Automated detection using LSTM-RNN, *Comput. Electron. Agric.*, 2020, 169, 105178.
15. Rahman A., Smith D., Little B., Ingham A., Greenwood P., Bishop-Hurley G. Cattle behaviour classification from collar, halter, and ear tag sensors, *Inform. Process. Agric.*, 2018, 5 (1), pp. 124-133.
16. Abandah G., Abdel-Karim A. Accurate and fast recurrent neural network solution for the automatic diacritization of Arabic text, *Jordan. J. Comp. Inform. Technol.*, 2020, 6 (2), pp. 103-121.
17. Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. O'Reilly Media, 2019.
18. Google TensorFlow, TensorFlow. Available at: <https://www.tensorflow.org/>. 2024 (accessed 22 January 2023).
19. Graves A., Mohamed A.R., Hinton G. Speech recognition with deep recurrent neural networks, *In: 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* 2013, pp. 6645-6649.
20. PyTorch documentation. Available at: <https://pytorch.org/docs/stable/index.html> (accessed 21 January 2023).
21. Candelaria M.D.E., Chua N.M.M., Kee S.-H. Evaluation of Heat-Induced Damage in Concrete Using Machine Learning of Ultrasonic Pulse Waves, *Materials (Basel)*, 2022, 15 (22), 7914. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15227914>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Кравченко.

Сингх Санны – Южный федеральный университет; e-mail: singkh@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79885751350; кафедра систем автоматического управления; аспирант.

Прибыльский Алексей Васильевич – e-mail: apribylsky@sfedu.ru; тел.: +79885619718; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Singh Sanni – Southern Federal University; e-mail: singkh@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885751350; the Department of Automatic Control Systems; graduate student.

Pribylskiy Alexey Vasilievich – e-mail: apribylsky@sfedu.ru; phone: +79885619718; the Department of Automatic Control Systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007.519.816

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-147-158

С.И. Родзин, А.В. Боженюк, Е.В. Нужнов

МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ МНОЖЕСТВ*

При возникновении чрезвычайной ситуации необходимо принять эффективные экстренные меры. Известно, что аварийное событие обладает характеристиками ограниченности времени и информации, вредоносности и неопределенности, а лица, принимающие решения, часто ограничены в рациональности в условиях неопределенности и риска. Психологическое поведение людей следует учитывать в реальных процессах принятия решений. Принятие решений в чрезвычайных ситуациях является актуальной задачей и предметом исследовательских интересов. В этой статье представ-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121, <https://rscf.ru/project/22-71-10121/> в Южном федеральном университете.

лен новый подход к принятию экстренных решений с использованием нечетких колеблющихся множеств. Для определения весов критериев строится математическая модель, которая позволяет преобразовать значения критериев в совместимую шкалу и исключить влияние различных шкал для их измерений. Чтобы отобразить психологическое поведение лиц, принимающих решения, вводится функция степени группового удовлетворения и функция ценности воспринимаемой полезности альтернативы. Вычисляется и ранжируется полезность альтернатив, приводится пример исследования чрезвычайной ситуации. По сравнению с существующими методами предлагаемый метод к принятию решений в условиях чрезвычайной ситуации имеет следующие особенности: расширяются возможности для определения весов критериев принятия решений, когда критерии имеют различную шкалу; метод учитывает психологию ЛПР, в отличие от известных подходов, предполагающих рациональность решений ЛПР; по сравнению с теорией проспектов метод не требует субъективной оценки уровня ожиданий, использует меньшее количество параметров, что расширяет область его применения. Предложенный метод также имеет некоторые ограничения: требуются определенные вычислительные затраты при большом количестве альтернативных решений и характеризующих их атрибутов. Однако это ограничение преодолевается при использовании программного обеспечения, такого как MATLAB. Интересной представляется возможность в будущем применить предлагаемый метод для задач оценки риска при принятии решений в условиях нечеткой информации, если значения атрибутов являются случайными величинами.

Нечеткое колеблющееся множество; групповое лицо принимающее решение; многокритериальная задача; оператор; агрегирование; теория проспектов; теория сожаления; чрезвычайная ситуация.

S.I. Rodzin, A.V. Bozhenyuk, E.V. Nuzhnov

METHOD OF MULTI-CRITERIA GROUP DECISION-MAKING IN AN EMERGENCY SITUATION USING FUZZY HESITANT SETS

In case of an emergency, effective emergency measures must be taken. It is known that an emergency event has the characteristics of limited time and information, harmfulness and uncertainty, and decision makers are often limited in rationality in conditions of uncertainty and risk. People's psychological behavior should be taken into account in real decision-making processes. Decision-making in emergency situations is an urgent task and the subject of research interests. This article presents a new approach to emergency decision-making using fuzzy oscillating sets. To determine the weights of the criteria, a mathematical model is built that allows you to convert the values of the criteria into a compatible scale and exclude the influence of different scales for their measurements. In order to display the psychological behavior of decision makers, a function of the degree of group satisfaction and a function of the value of the perceived usefulness of the alternative are introduced. The usefulness of alternatives is calculated and ranked, and an example of an emergency study is given. Compared with existing methods, the proposed method for decision-making in an emergency situation has the following features: the possibilities for determining the weights of decision-making criteria are expanded when the criteria have a different scale; the method takes into account the psychology of LPR, unlike well-known approaches that assume the rationality of LPR decisions; compared with the theory of prospectuses, the method does not require a subjective assessment of the level of It uses fewer parameters, which expands the scope of its application. The proposed method also has some limitations: certain computational costs are required with a large number of alternative solutions and their characteristic attributes. However, this limitation is overcome when using software such as MATLAB. It is interesting to consider the possibility in the future to apply the proposed method for risk assessment tasks when making decisions in conditions of fuzzy information, if the attribute values are random variables.

Fuzzy hesitant set; group decision maker; multi-criteria task; operator; aggregation; prospect theory; regret theory; emergency.

Введение. Количество чрезвычайных ситуаций, связанных с промышленными авариями, террористическими атаками и природными бедствиями, несущих отрицательные последствия для жизнедеятельности людей большими материальными потерями, возрастает ежегодно в геометрической прогрессии. Когда происходит чрезвычайное событие, лица, принимающие решения (ЛПР), должны сформулировать планы или выбрать эффективную альтернативу чрезвычайной ситуации, чтобы предотвратить ее дальнейшее ухудшение. Принятие решений в чрезвычайных ситуациях является актуальной задачей и предметом исследовательских интересов.

Практика показывает, что ЛПР зачастую ограничены в рациональности принимаемых решений в условиях неопределенности и риска [1]. Следовательно, психологическое поведение людей следует учитывать в реальных процессах принятия решений. Особенностью реагирования на чрезвычайные ситуации является своевременность, а также наличие неопределенной информации о чрезвычайной ситуации. Необходимо разрабатывать методы принятия решений с учетом поведения людей. В [2] предложили метод принятия решений, связанных с оценкой риска, основанный на теории кумулятивных проспектов, для решения проблемы принятия решений о риске при реагировании на чрезвычайные ситуации. В [3] представлен метод интервальных динамических контрольных точек, основанный на теории проспектов для принятия экстренных решений. Оба подхода не лишены недостатков при принятии решений – они не объясняют многие аспекты принятия решений и риска ЛПР. Необходимы более реалистичные модели принятия решений. В [4] предложена так называемая теория сожаления для решения многокритериальных проблем принятия решений, где значения атрибутов критериев представлены в форме интервальных чисел. В [5] исследовался нечеткий подход к принятию ЛПР групповых решений с несколькими атрибутами с неполной информацией, учитывающий теорию сожаления. В [6] предложен стохастический метод принятия решений, основанный на теории сожаления и методе TOPSIS.

Необходимы новые инструменты для моделирования многокритериального группового принятия решений в чрезвычайной ситуации с использованием нечетких множеств. Одним из таких инструментов являются колеблющиеся нечеткие множества (*Hesitant Fuzzy Set, HFS*) [7], моделирующие ситуации, когда люди колеблются в отношении того или иного решения. Например, при возникновении чрезвычайной ситуации следует принять меры для минимизации риска и потерь. Процесс выбора альтернатив можно интерпретировать как экстренное принятие решений с учетом суждений нескольких экспертов. Обычно мнения разделяются и прийти к согласию сложно. Именно в подобного рода ситуациях актуальным становится применение *HFS*. Способность *HFS* отображать нечеткость и сохранять исходную информацию привлекли внимание исследователей в [8], где был предложен подход к применению *HFS* в ситуации принятия экстренных решений, основанный на теории рациональных решений.

В данной статье исследуется подход, при котором необходимо количественно выразить колебания ЛПР в нечетких условиях и определить веса критериев в процессе принятия решений. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- ♦ рассчитать значения полезности альтернатив и отразить колебания ЛПР в контексте нечеткой среды;
- ♦ определить веса критериев принятия решений с атрибутами разной размерности;
- ♦ разработать метод на основе *HFS* для принятия экстренных решений при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях неопределенности и риска.

Нечеткие колеблющиеся множества и теория сожаления. Предположим, что X – некоторое базовое множество. Тогда *HFS* определяется как колеблющееся нечеткое множество на X на интервале $[0, 1]$ [38]:

$$HFS = \{ \langle x, h_{HFS}(x) \rangle | x \in X \}, \quad (1)$$

Здесь $h_{HFS}(x)$ является колеблющимся нечетким элементом (*HFE*), который обозначает возможные степени принадлежности $x \in X$ множеству *HFS*.

В [38] были также представлены операции над *HFS* и оператор колеблющегося нечетко-взвешенного усреднения (*HFWA*).

Среднее значение *HFS* определяется как

$$s(HFS) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_{HFS}(x_j), x_j \in X, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Стандартное отклонение равно

$$\sigma(HFS) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (s(h_{HFS}(x_j)) - s(HFS))^2}. \quad (3)$$

Теория сожаления была представлена в [10]. Согласно теории сожаления, ЛПР радуются тому, что выбранная альтернатива принесет лучшие результаты, нежели другие; в противном случае они чувствуют сожаление.

Пусть x_1 и x_2 являются результатами, полученными при выборе альтернатив A_1 и A_2 соответственно, тогда предполагаемая полезность альтернативы A_1 определяется следующим образом:

$$u(x_1, x_2) = v(x_1) + R(v(x_1) - v(x_2)). \quad (4)$$

Здесь v обозначает функцию полезности, а R – функцию сожаления, которая обозначает разницу между двумя значениями полезности альтернатив A_1 и A_2 . Если $R > 0$, то ЛПР позитивно воспринимают выбранную альтернативу, иначе – чувствуют сожаление.

В общем случае функция $v(x)$ является степенной и служит для количественной оценки значения полезности:

$$v(x) = x^\alpha (\alpha \in [0,1]),$$

где α обозначает коэффициент неприятия риска ЛПР. Чем меньше α , тем больше неприятие риска у ЛПР. Влияние параметра α на функцию полезности $v(x)$ представлено на рис. 1.

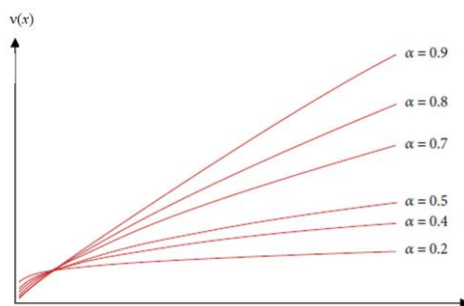


Рис. 1. График степенной функции полезности $v(x)$ в зависимости от параметра α

Функция R является строго возрастающей и вогнутой:

$$R(x) = 1 - \exp(-\delta \cdot x),$$

где $\delta \in [0, 1]$ обозначает коэффициент сожаления/радости. Влияние параметра δ на функцию сожаления/радости показано на рис. 2.

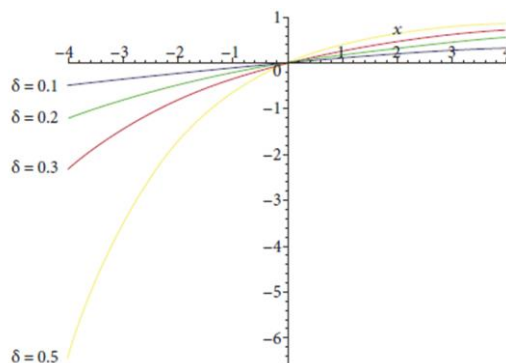


Рис. 2. График функции сожаления/радости R в зависимости от параметра δ

На практике оптимальную альтернативу необходимо выбирать из множества альтернатив. Поэтому воспринимаемую полезность альтернативы A_i ($i=1, 2, \dots, m$) можно определить следующим образом:

$$u_i = v(x_i) + R(v(x_i) - v(x^*)). \quad (5)$$

Здесь $x^* = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_i\}$. В теории сожаления классическая функция полезности модифицируется за счет включения слагаемого «сожаление/радость». Следовательно, воспринимаемая полезность для ЛПР той или иной альтернативы состоит из двух компонентов: полезности и сожаления/радости.

Постановка задачи. Стихийные бедствия происходят все чаще и наносят серьезный экономический и социальный ущерб [11]. Принятие экстренных решений играет важную роль в чрезвычайных ситуациях [12].

Пусть $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ – множество альтернатив, $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – множество атрибутивных критериев, весовой вектор которых равен

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T, \text{ причем } \sum_{j=1}^n w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n.$$

Для принятия решений привлекаются Δ_k экспертов ($k = 1, 2, \dots, \phi$).

Информация о весах критериев неизвестна из-за неясности ситуации и нечеткой информации. Предположим, что эксперты оценивают альтернативы Y_i относительно критериев C_j . Пусть результатом их оценивания является $D_k = (h_{ij}^k)_{m \times n}$ – нечеткая колеблющаяся матрица решений. Здесь h_{ij}^k (HFE), обозначает заданную экспертом колеблющуюся степень принадлежности i -й альтернативы j -му критерию.

Атрибуты критериев могут относиться к разным типам и быть разнонаправленными. Их необходимо нормализовать, представив в виде следующей матрицы:

$$R_k = (r_{ij}^k)_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} r_{11}^k & \dots & r_{1n}^k \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1}^k & \dots & r_{mn}^k \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

$$\text{где } r_{ij}^k = \begin{cases} h_{ij}^k, & \text{для атрибута пользы } C_j, \\ (h_{ij}^k)^c, & \text{для атрибута стоимости } C_j, \end{cases} \quad (7)$$

$j=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, \phi.$

Подход к определению весов критериев. При принятии решений с использованием нескольких критериев их вес является одним из основных факторов, влияющих на результаты решения. Предлагается новый подход для определения весов критериев. Подход основан на следующей природной аналогии [13]. При налипании воды в емкость с неровным дном можно обнаружить, что высота приподнятой части дна изменяется обратно пропорционально объему воды. Это описывается следующей формулой [14]:

$$T = \sum_{j=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{\alpha_j^2 P_j}{\sigma_j^2} \right), \quad (8)$$

где T – пропускная способность потока воды, α_j – коэффициент, P_j – заданная мощность, σ_j – дисперсия. Чтобы определить веса критериев, построим оптимизационную модель, основанную на процессе заполнения водой емкости с неровным дном.

Пусть w_j – вес критерия C_j , такой, что $\sum_{j=1}^n w_j = 1; 0 \leq w_j \leq 1; j = 1, 2, \dots, n$. Тогда общий вес критериев равен

$$T_w = \sum_{j=1}^n \log_2 \left[1 + \left(\frac{s(C_j)}{\sigma(C_j)} \right)^2 \cdot w_j \right]. \quad (8)$$

Здесь $s(C_j)$ и $\sigma(C_j)$ представляют собой среднее и стандартное отклонение критерия C_j соответственно, которые рассчитываются согласно (2) и (3). Чем больше значение T_w , тем больший вес присваивается критерию:

$$\max T_w = \sum_{j=1}^n \log_2 \left[1 + \left(\frac{s(C_j)}{\sigma(C_j)} \right)^2 \cdot w_j \right]; \sum_{j=1}^n w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1. \quad (9)$$

Чтобы построить модель для определения весов критериев при колебании ЛПР при принятии решений в нечеткой среде, строится функция Лагранжа:

$$L(\xi, w) = \sum_{j=1}^n \log_2 \left[1 + \left(\frac{s(c_j)}{\sigma(c_j)} \right)^2 \cdot w_j \right] + \xi \cdot (\sum_{j=1}^n w_j - 1), \quad (10)$$

где ξ обозначает множитель Лагранжа и является действительным числом.

Дифференцируя (10) по ξ и w_j и приравняв их нулю, получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w_j} = \frac{1}{\ln 2 \cdot (1 + (s(c_j)/\sigma(c_j))^2 \cdot w_j)} \cdot \left(\frac{s(c_j)}{\sigma(c_j)} \right)^2 + \xi = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \xi} = \sum_{j=1}^n w_j - 1 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Решая систему уравнений (11), вычисляем веса критериев:

$$w_j = \frac{1}{n} \left[1 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\sigma(c_j)}{s(c_j)} \right)^2 \right] - \left(\frac{\sigma(c_j)}{s(c_j)} \right)^2, j = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

Здесь безразмерная величина $\frac{\sigma(c_j)}{s(c_j)}$ определяет степень изменчивости веса относительно среднего значения. С помощью (12) получаем более объективные и разумные веса критериев.

Метод, основанный на теории сожаления, для многокритериального группового принятия решений в чрезвычайной ситуации с использованием нечетких колеблющихся множеств. Принимая решения в чрезвычайной ситуации, ЛПР обычно колеблются в отношении того или иного решения. Используем *HFE* для моделирования этой ситуации. Понятно, что чем меньше расхождений между членами группового ЛПР, тем более последовательным является решение и тем более удовлетворительными являются его результаты. Введем индекс для измерения степени удовлетворенности группы ЛПР.

Пусть h – колеблющийся нечеткий элемент *HFE*. Тогда индекс степени удовлетворенности группы ЛПР определяется как

$$G(h) = \frac{s(h)}{1 + \sigma(h)}. \quad (13)$$

Стандартное отклонение $\sigma(h)$ в (13) отражает уровень согласованности в группе ЛПР. Чем меньше значение $\sigma(h)$, тем выше согласованность, а чем больше $s(h)$, тем выше степень удовлетворенности группы $G(h)$.

Зная степень групповой удовлетворенности, предлагается следующий подход к колеблющемуся нечеткому принятию решений в чрезвычайной ситуации.

Определяется значение сожаления/радости для альтернативы A_i по отношению к критерию C_j :

$$R_{ij} = R \left(v \left(G(h_{ij}) \right) - v \left(G(h_j^*) \right) \right), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Здесь R представляет собой функцию сожаления/радости

$$(R(x) = 1 - \exp(-\delta \cdot x)),$$

а величина $G(h_j^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{G(h_{ij})\}$.

Поскольку $G(h_{ij}) \leq G(h_j^*)$, то $R_{ij} \leq 0$. В этом случае R_{ij} представляет собой значение сожаления. Тогда согласно (4) мы можем получить матрицу воспринимаемой полезности $U = (u_{ij})_{m \times n}$, где

$$u_{ij} = v \left(G(h_{ij}) \right) + R(v(G(h_{ij})) - v(G(h_j^*))), i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Соответственно, общая воспринимаемая ценность полезности для каждой альтернативы A_i определяется как

$$u_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} w_j, i = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

Чем больше u_i , тем предпочтительнее альтернатива A_i . Таким образом, появляется возможность ранжировать альтернативы по u_i .

Предлагаемый метод включает следующие шаги.

Шаг 1. Для принятия экстренных решений при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях неопределенности и риска экспертам оцениваем множество $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ альтернатив по критериям $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, где все их атрибутивные значения представлены колеблющимися нечеткими элементами в форме *HFE*. Эксперты оценивают альтернативы Y_i относительно критериев C_j . Результатом их оценивания является $D_k = (h_{ij}^k)_{m \times n}$ – колеблющаяся нечеткая матрица решений.

Шаг 2. Нормализуем матрицы $D_k = (h_{ij}^k)_{m \times n}$, получив согласно (6), (7) матрицы $R_k = (r_{ij}^k)_{m \times n}$. Агрегируем согласно [9] индивидуальные матрицы в матрицу коллективных колеблющихся нечетких решений $R = (r_{ij})_{m \times n}$.

Шаг 3. Определяем веса критериев w_j ($j = 1, 2, \dots, n$) согласно (12).

Шаг 4. Определяем степень удовлетворенности группы $G(h_j^*)$ и строим матрицу воспринимаемой полезности $U = (u_{ij})_{m \times n}$, где u_{ij} рассчитывается согласно (15).

Шаг 5. Рассчитываем общую воспринимаемую ценность полезности для каждой альтернативы согласно (16) и ранжируем альтернативы по u_i .

Шаг 6. Конец.

Пример. Рассмотрим пример принятия экстренных решений в качестве иллюстрации предлагаемого метода, а также попробуем сравнить метод с другими подходами.

Произошел пожар и взрыв на складе опасных химикатов. В результате аварии имеются погибшие и госпитализированные, большие экономические потери, загрязнение окружающей среды и неблагоприятные социальные последствия. Необходимо обеспечить эффективный способ реагирования на чрезвычайную ситуацию, чтобы избежать дополнительных потерь.

При рассмотрении требований к реагированию на чрезвычайную ситуацию необходимо учитывать следующие критерии и факторы:

C_1 – организация эвакуации и спасения жизней пострадавших;

C_2 – мониторинг ситуации, обнаружение скрытых опасностей;

C_3 – предотвращение других взрывов.

Предположим, что имеются три альтернативы $\{Y_1, Y_2, Y_3\}$ и два эксперта, которые контролируют процесс реагирования на чрезвычайную ситуацию и оценивают альтернативы по критериям, представленным выше. Применим предложенный метод для выбора оптимальной альтернативы.

Шаг 1. Эксперты оценивают альтернативы Y_1, Y_2, Y_3 относительно критериев C_1, C_2, C_3 . Результатом их оценивания являются две колеблющихся нечетких матрицы D_1 и D_2 :

D_1	C_1	C_2	C_3	D_2	C_1	C_2	C_3
Y_1	{0,6; 0,7}	{0,7}	{0,4; 0,6}	Y_1	{0,7}	{0,5}	{0,3; 0,4; 0,5}
Y_2	{0,6}	{0,6; 0,7}	{0,4}	Y_2	{0,5; 0,7}	{0,6}	{0,3}
Y_3	{0,6}	{0,5}	{0,5; 0,7}	Y_3	{0,6; 0,8}	{0,4}	{0,5}

Шаг 2. C_1, C_2, C_3 являются критериями пользы. Поэтому агрегируем согласно [9] индивидуальные матрицы решений D_1 и D_2 в коллективную матрицу D в предположении, что оба эксперта имеют одинаковый вес:

D	C_1	C_2	C_3
Y_1	{0,6536; 0,7}	{0,6127}	{0,3519; 0,4; 0,4523; 0,4708; 0,5; 0,5528}
Y_2	{0,5528; 0,6536}	{0,5999; 0,6536}	{0,3519}
Y_3	{0,5999; 0,7171}	{0,4523}	{0,5; 0,6127}

Шаг 3. Согласно (12) определяем веса критериев:

$w_1 = 0,3496$;

$w_2 = 0,3322$;

$w_3 = 0,3182$.

Шаг 4. Вычисляем матрицу степени удовлетворенности группы $G = (g_{ij})_{3 \times 3}$ согласно (13):

$$G = \begin{pmatrix} 0,6553 & 0,6127 & 0,4253 \\ 0,5631 & 0,6039 & 0,3519 \\ 0,6081 & 0,4523 & 0,5153 \end{pmatrix}$$

Определяем степень удовлетворенности группы $G(h_j^*)$ и строим матрицу воспринимаемой полезности $U = (u_{ij})_{3 \times 3}$, где u_{ij} рассчитывается согласно (15):

$$U = \begin{pmatrix} 0,6894 & 0,6498 & 0,4449 \\ 0,5771 & 0,6391 & 0,3500 \\ 0,6322 & 0,4507 & 0,5580 \end{pmatrix}$$

Значение коэффициента $\alpha = 0,88$ устанавливается в соответствии с [15], а значение $\delta = 0,3$ согласно [16].

Шаг 5. Рассчитываем общую воспринимаемую ценность полезности для каждой альтернативы согласно (16):

$$u_1 = 0,5984;$$

$$u_2 = 0,5254;$$

$$u_3 = 0,5483.$$

Ранжируем альтернативы по u_i : $Y_1 > Y_3 > Y_2$. Таким образом оптимальной альтернативой является Y_1 .

Сравним на данном примере предлагаемый метод с другими известными подходами.

В [17] для решения проблемы принятия экстренных решений предлагался известный метод, основанный на теории проспектов. Как и в рассмотренном выше примере предполагалось, что два эксперта имеют одинаковый вес, а колеблющиеся нечеткие отношения предпочтений были представлены двумя экспертами следующим образом:

$$P_1 = P_2 = \begin{bmatrix} \{0,5\} & \{0,6\} & \{0,6\} \\ \{0,4\} & \{0,5\} & \{0,5\} \\ \{0,4\} & \{0,5\} & \{0,5\} \end{bmatrix}.$$

Уровень ожиданий каждого из экспертов являлся следующим:

$$L_1 = (0,5; 0,6; 0,4),$$

$$L_2 = (0,6; 0,4; 0,4).$$

$$\text{Вектор приоритета критериев } W^1 = W^2 = (0,4; 0,3; 0,3)^T.$$

Затем по методу перспектив в [17] были построены соответствующие колеблющиеся нечеткие матрицы решений. Оптимальной альтернативой оказалась Y_2 : $Y_2 > Y_1 > Y_3$.

Этот результат отличается от результата, полученного предлагаемым методом. Метод, предложенный в [17], требует от ЛПР субъективной оценки уровня ожиданий, кроме того, по сравнению с предлагаемым подходом, расчетная формула теории проспектов включает в себя больше параметров, что усложняет принятие решения. К тому же метод проспектов требует от экспертов попарного сравнения критериев, имеющих разные типы.

В [18] представлен подход, основанный на методе TOPSIS (определение оптимального решения по близости с идеальным решением), для колеблющегося принятия решений с нечеткими атрибутами. Для рассмотренного выше примера согласно методу [18] коллективная матрица D в предположении, что оба эксперта имеют одинаковый вес, имеет следующий вид:

D	C_1	C_2	C_3
Y_1	{0,6536; 0,6536; 0,6536; 0,6536; 0,6536; 0,7}	{0,6127; 0,6127; 0,6127; 0,6127; 0,6127; 0,6127}	{0,3519; 0,4000; 0,4523; 0,4708; 0,5101; 0,5528}
Y_2	{0,5528; 0,5528; 0,5528; 0,5528; 0,5528; 0,6536}	{0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,6536}	{0,3519; 0,3519; 0,3519; 0,3519; 0,3519; 0,3519}
Y_3	{0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,5999; 0,7171}	{0,4523; 0,4523; 0,4523; 0,4523; 0,4523; 0,4523}	{0,5000; 0,5000; 0,5000; 0,5000; 0,5000; 0,6127}

Отсюда были определены веса атрибутов:

$$w_1 = 0,1818;$$

$$w_2 = 0,3875;$$

$$w_3 = 0,4307.$$

Относительная близость альтернатив к идеальному решению согласно TOPSIS определяется следующим образом:

$$R_1 = 0,7580;$$

$$R_2 = 0,3876;$$

$$R_3 = 0,5233.$$

Таким образом, оптимальной альтернативой по методу TOPSIS оказалась Y_1 : $Y_1 > Y_3 > Y_2$. Этот результат совпадает с предлагаемым подходом, что подтверждает его обоснованность. Однако между этими методами есть определенные различия. В [18] для определения весов атрибутов использовался метод максимизации отклонения, согласно которому атрибуту с большим значением отклонения среди альтернатив будет присвоен больший вес. Поэтому для получения объективного веса атрибутов их необходимо преобразовать в безразмерную шкалу. Кроме того, предлагаемый метод учитывает отклонения ЛПР от рациональности, в отличие от нечеткого метода TOPSIS.

По сравнению с существующими методами предлагаемый подход к принятию решений в условиях чрезвычайной ситуации имеет следующие особенности:

- ♦ расширяются возможности для определения весов критериев принятия решений, когда критерии имеют различную шкалу;
- ♦ метод учитывает психологию ЛПР, в отличие от известных подходов, предполагающих рациональность решений ЛПР;
- ♦ по сравнению с теорией проспектов метод не требует субъективной оценки уровня ожиданий, использует меньшее количество параметров, что расширяет область его применения.

Заключение. В современном мире чрезвычайные события происходят все чаще в связи с активизацией человеческой деятельности и экономического развития, что серьезно угрожает жизни и имуществу людей. Являясь важной частью управления чрезвычайными ситуациями, принятие экстренных решений играет важную роль в купировании их последствий и имеет большую общественную значимость [19–21]. В этой статье предлагается подход, позволяющий оценить полезность альтернативных решений с учетом колебаний ЛПР, определить веса критериев разной размерности для принятия экстренных решений при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях неопределенности и риска.

Отмечается, что психологические особенности ЛПР должны быть интегрированы в анализ при реальном процессе принятия решений. С этой целью предлагается нечеткий метод принятия экстренных решений, основанный на теории сожаления и учитывающий колебания ЛПР. Построена математическая модель для определения весов атрибутов с различными шкалами измерений, подход к измерению и расчету степени групповой удовлетворенности, что делает предлагаемый метод применимым к реальным проблемам принятия решений.

Предложенный метод также имеет некоторые ограничения: требуются определенные вычислительные затраты при большом количестве альтернативных решений и характеризующих их атрибутов. Однако это ограничение преодолевается при использовании популярного программного обеспечения, такого как MATLAB.

Интересной представляется возможность в будущем применить предлагаемый метод для задач оценки риска при принятии решений в условиях нечеткой информации, если значения атрибутов являются случайными величинами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bozhenyuk A.V., Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Multi-Criteria group decision-making: a fuzzy algorithm for emergency evacuation tasks // *Proc. Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon)*. – Publ. IEEE, 2023. – P. 214-218.
2. *Liu Y., Fan Z., Zhang Y.* Risk decision analysis in emergency response: a method based on cumulative prospect theory // *Computers and Operations Research*. – 2014. – Vol. 42. – P. 75-82.
3. *Wang L., Zhang Z., Wang Y.* A prospect theory-based interval dynamic reference point method for emergency decision making // *Expert Systems with Applications*. – 2015. – Vol. 42, No. 23. – P. 9379-9388.
4. *Bleichrodt H., Cillo A., Diecidue E.* A quantitative measurement of regret theory // *Management Science*. – 2010. – Vol. 56, No. 1. – P. 161-175.
5. *Zhang S., Zhu J., Liu X., Chen Y.* Regret theory-based group decision-making with multidimensional preference and incomplete weight information // *Information Fusion*. – 2016. – Vol. 31. – P. 1-13.
6. *Zhou H., Wang J., Zhang H.* Grey stochastic multicriteria decision-making based on regret theory and TOPSIS // *Int. Jour. of Machine Learning and Cybernetics*. – 2017. – Vol. 8, No. 2. – P. 651-664.
7. *Torra V.* Hesitant fuzzy sets // *Int. Jour. of Intelligent Systems*. – 2010. – Vol. 25. – P. 529-539.
8. *Zhang Z., et al.* A hesitant group emergency decision making method based on prospect theory // *Complex & Intelligent Systems*. – 2017. – Vol. 3, No. 3. – P. 177-187.
9. *Xia M., Xu Z.* Hesitant fuzzy information aggregation in decision making // *Int. Jour. of Approximate Reasoning*. – 2011. – Vol. 52, No. 3. – P. 395-407.
10. *Loomes G., Sugden R.* Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty // *Economic Journal*. – 1982. – Vol. 92, No. 368. – P. 805-824.
11. *Родзин С.И., Боженюк А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н.* Методы нечеткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2023. – № 2. – С. 186-200.
12. *Герасименко Е.М., Курейчик В.В., Родзин С.И., Кухаренко А.П.* Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 15-29.
13. *Герасименко Е.М., Кравченко Д.Ю., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Кулиев Э.В., Родзин С.И.* Модифицированный биоинспирированный метод поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // *Информационные технологии*. – 2023. – Т. 29, № 8. – С. 423-436.
14. *Zhao H., Yan A.J., Wang P.* On improving reliability of case-based reasoning classifier // *Acta Automatica Sinica*. – 2014. – Vol. 40, No. 9. – P. 2029-2036.
15. *Tversky A., Kahneman D.* Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty // *Journal of Risk and Uncertainty*. – 1992. – Vol. 5, No. 4. – P. 297-323.
16. *Liu X., Wang Z., Zhang S.* A new methodology for hesitant fuzzy Emergency decision making with unknown weight information // *Complexity*. – 2018. – 12 p. – <https://doi.org/10.1155/2018/5145348>.
17. *Humphrey S.J.* Feedback-conditional regret theory and testing regret-aversion in risky choice // *Journal of Economic Psychology*. – 2004. – Vol. 25, No. 6. – P. 839-857.
18. *Xu Z., Zhang X.* Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information // *Knowledge-Based Syst.* – Vol. 52, No. 6. – P. 53-64.
19. *Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I.* Evacuation Centers Choice by Intuitionistic Fuzzy Graph // *Proc. Int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems on the WWW (HIS), LNNS*. – 2023. – Vol. 647. – P. 391-400.
20. *Кравченко Д.Ю., Кравченко Ю.А., Кулиев Э.В., Родзин С.И.* Алгоритм выявления предпосылок возникновения чрезвычайных ситуаций на основе правил "ЕСЛИ-ТО" // *Информатизация и связь*. – 2023. – № 2. – С. 11-17.
21. *Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I.* Finding the Optimal Placement of Evacuation Centers by Antibase Set of Intuitionistic Fuzzy Graph // *Int. Jour. of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*. – 2023. – Vol. 15. – P. 13-22.

REFERENCES

1. *Bozhenyuk A.V., Rodzin S.I., Rodzina L.S.* Multi-Criteria group decision-making: a fuzzy algorithm for emergency evacuation tasks, *Proc. Int. Russian Automation Conf. (RusAutoCon)*. Publ. IEEE, 2023, pp. 214-218.
2. *Liu Y., Fan Z., Zhang Y.* Risk decision analysis in emergency response: a method based on cumulative prospect theory, *Computers and Operations Research*, 2014, Vol. 42, pp. 75-82.
3. *Wang L., Zhang Z., Wang Y.* A prospect theory-based interval dynamic reference point method for emergency decision making, *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, No. 23, pp. 9379-9388.

4. Bleichrodt H., Cillo A., Diecidue E. A quantitative measurement of regret theory, *Management Science*, 2010, Vol. 56, No. 1, pp. 161-175.
5. Zhang S., Zhu J., Liu X., Chen Y. Regret theory-based group decision-making with multidimensional preference and incomplete weight information, *Information Fusion*, 2016, Vol. 31, pp. 1-13.
6. Zhou H., Wang J., Zhang H. Grey stochastic multicriteria decision-making based on regret theory and TOPSIS, *Int. Jour. of Machine Learning and Cybernetics*, 2017, Vol. 8, No. 2, pp. 651-664.
7. Torra V. Hesitant fuzzy sets, *Int. Jour. of Intelligent Systems*, 2010, Vol. 25, pp. 529-539.
8. Zhang Z., et al. A hesitant group emergency decision making method based on prospect theory, *Complex & Intelligent Systems*, 2017, Vol. 3, No. 3, pp. 177-187.
9. Xia M., Xu Z. Hesitant fuzzy information aggregation in decision making, *Int. Jour. of Approximate Reasoning*, 2011, Vol. 52, No. 3, pp. 395-407.
10. Loomes G., Sugden R. Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty, *Economic Journal*, 1982, Vol. 92, No. 368, pp. 805-824.
11. Rodzin S.I., Bozhenyuk A.V., Kravchenko Yu.A., Rodzina O.N. Metody nechetskogo mnogokriterial'nogo gruppovogo prinyatiya resheniy dlya zadach evakuatsii pri chrezvychaynykh situatsiyakh [Methods of fuzzy multi-criteria group decision-making for emergency evacuation tasks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 2, pp. 186-200.
12. Gerasimenko E.M., Kureychik V.V., Rodzin S.I., Kukharensko A.P. Primenenie nechetskoy logiki dlya prinyatiya resheniy ob evakuatsii pri navodnenii [Using fuzzy logic to make decisions about flood evacuation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 4, pp. 15-29.
13. Gerasimenko E.M., Kravchenko D.Yu., Kravchenko Yu.A., Kureychik V.V., Kuliev E.V., Rodzin S.I. Modifitsirovannyi bioinspirirovannyi metod podderzhki prinyatiya resheniy po preduprezhdeniyu i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy [A modified bioinspired method of decision support for the prevention and elimination of consequences of emergency situations], *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2023, Vol. 29, No. 8, pp. 423-436.
14. Zhao H., Yan A.J., Wang P. On improving reliability of case-based reasoning classifier, *Acta Automatica Sinica*, 2014, Vol. 40, No. 9, pp. 2029-2036.
15. Tversky A., Kahneman D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty, *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, Vol. 5, No. 4, pp. 297-323.
16. Liu X., Wang Z., Zhang S. A new methodology for hesitant fuzzy Emergency decision making with unknown weight information, *Complexity*, 2018, 12 p. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/5145348>.
17. Humphrey S.J. Feedback-conditional regret theory and testing regret-aversion in risky choice, *Journal of Economic Psychology*, 2004, Vol. 25, No. 6, pp. 839-857.
18. Xu Z., Zhang X. Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information, *Knowledge-Based Syst.*, Vol. 52, No. 6, pp. 53-64.
19. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I. Evacuation Centers Choice by Intuitionistic Fuzzy Graph, *Proc. Int. Conf. on Hybrid Intelligent Systems on the WWW (HIS), LNNS*, 2023, Vol. 647, pp. 391-400.
20. Kravchenko D.Yu., Kravchenko Yu.A., Kuliev E.V., Rodzin S.I. Algoritm vyyavleniya predposylok vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na osnove pravil "ESLI-TO" [An algorithm for identifying the prerequisites for emergency situations based on the "IF-THEN" rules], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2023, No. 2, pp. 11-17.
21. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M., Rodzin S.I. Finding the Optimal Placement of Evacuation Centers by Antibase Set of Intuitionistic Fuzzy Graph, *Int. Jour. of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 2023, Vol. 15, pp. 13-22.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.М. Ковалев.

Родзин Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: srodzin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; профессор.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avbozhenyuk@sfedu.ru; кафедра информационно-аналитических систем безопасности; профессор.

Нужнов Евгений Владимирович – e-mail: evnuzhnov@sfedu.ru; кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

Rodzin Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: srodzin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Software Engineering; professor.

Bozhenyuk Alexander Vitalyevich – e-mail: avb002@yandex.ru; the Department of Information and Analytical Security System; professor.

Nuzhnov Evgeny Vladimirovich – e-mail: evnuzhnov@sfedu.ru; the Department of Computer-Aided Design Systems; professor.

УДК 004.932.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-3-158-168

К.О. Север, К.Н. Алексеев, И.И. Турулин**РЕАЛИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛИМОГО ДВУМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА НА ПЛИС**

В современных системах видеонаблюдения, в которых широко распространено использование технологии компьютерного зрения, наиболее важной информацией на изображении являются данные о контурах объектов и выделение мелких деталей. К системам предъявляются жесткие требования, такие как: высокая скорость обработки информации с большого количества камер одновременно, работа в условиях плохого освещения объекта и под воздействием внешних шумов (электромагнитных полей, коротких помех от высоковольтных линий передач). Поэтому совершенствование методов обработки изображения с применением устройств распараллеливания вычислений и построения многопоточной системы является актуальной задачей. В данной работе для обработки изображения на ПЛИС разработан и смоделирован анизотропный фильтр высоких частот 3×3 . Описан алгоритм его построения в виде разделимого векторного представления. Дано подробное описание о разработке эффективного разделимого двумерного цифрового фильтра для повышения резкости и выделения границ объектов RGB-изображений. Фильтр основан на синтезе предложенного анизотропного фильтра высоких частот 3×3 и градиентного фильтра Собеля. Спроектирована соответствующая структурная схема фильтра. По результатам обработки искаженного изображения можно сделать вывод о том, что разработанный фильтр обладает свойством более равномерной детализации и выделения объектов на изображении и менее подвержен гауссовскому шуму по сравнению с градиентным фильтром Собеля и фильтром высоких частот Лапласа. Разработана схема конвейера фильтра на ПЛИС для обработки одной плоскости RGB изображения. За счет использования разделимых фильтров предложенная реализация практически в 2 раза оптимальнее по числу выполняемых операций сложения/вычитания, чем прямая реализация градиентного фильтра Собеля 3×3 и анизотропного фильтра высоких частот 3×3 .

Обработка изображений; двумерные цифровые фильтры; фильтр высоких частот; фильтр Собеля; ПЛИС; резкость.

К.О. Sever, K.N. Alekseev, I.I. Turulin**IMPLEMENTATION OF AN EFFICIENT SEPARABLE VECTOR DIGITAL FILTER ON FPGA**

In modern video surveillance systems, in which the use of computer vision technology is widespread, the most important information in the image is data on the contours of objects and the highlighting of small details. The systems are subject to stringent requirements, such as: high speed of processing information from a large number of cameras simultaneously, operation in conditions of poor lighting of the object and under the influence of external noise (electromagnetic fields, short interference from high-voltage transmission lines). Therefore, improving image processing methods using parallel computing devices and building a multi-threaded system is an urgent task. In this work, a 3×3 anisotropic high-pass filter is designed and simulated for image processing on an FPGA. An algorithm for its construction in the form of a separable vector representation is described. A detailed description is given of the development of an effective separable two-dimensional digital filter for sharpening and highlighting the boundaries of objects in RGB images. The filter is based on the synthesis of the proposed 3×3 anisotropic high-pass filter and the Sobel gradient filter. The corresponding block diagram of the filter has been designed. Based on the results of processing the distorted image, we can conclude that the developed filter has the property of more uniform detailing and high-