УДК 621.396.96

Кравченко Ю. В., докт. техн. наук, проф. (Тел.+380 (95) 068 86 25. E-mail: yl143@rambler.ru)
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

Поліщук А. О., студент (Тел.: +380 (63)535 11 04. E-mail: polischukao@gmail.com)
(Університет економіки і права «КРОК», м. Київ)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗНАНЬ У СИСТЕМІ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Кравченко Ю. В., Поліщук А. О. Математична модель представлення знань у системі екологічного моніторингу. Стаття присвячена актуальним питанням підвищення ефективності регіональних систем екологічного моніторингу. Запропоновано підхід, який побудований на комплексному використанні організаційної складової та апаратно-програмного комплексу з використанням теорії штучного інтелекту. В роботі удосконалено математичну модель представлення знань у системі моніторингу, яка базується на ідеї використання нечіткої *N*-арної неоднорідної семантичної мережі та елементарних семантичних мереж 1-го та 2-го роду. Використання моделі дозволяє створювати більш повні та достовірні бази знань в будь-яких системах штучного інтелекту.

Ключові слова: інтелектуальна система, семантична мережа, нечітка множина. представлення знань, екологічний моніторинг, штучний інтелект

Кравченко Ю. В., Полищук А. А. Математическая модель представления знаний в системе экологического мониторинга. Статья посвящена актуальным вопросам повышения эффективности региональных систем экологического мониторинга. Предложен подход, который построен на комплексном использовании организационной составляющей и аппаратно-программного комплекса с использованием теории искусственного интеллекта. В работе усовершенствована математическую модель представления знаний в системе мониторинга, основанная на идее использования нечеткой *N*-арной неоднородной семантической сети и элементарных семантических сетей 1-го и 2-го рода. Использование модели позволяет создавать более полные и достоверные базы знаний в любых системах искусственного интеллекта.

Ключевые слова: интеллектуальная система, семантическая сеть, нечеткое множество, представление знаний, экологический мониторинг, искусственный интеллект

Вступ. Постановка задачі. В сучасних умовах розвитку суспільства актуальні питання щодо покращення функціонування регіональних систем екологічного моніторингу, як підсистем глобальної Національної системи екологічного моніторингу. Запропоновано підхід щодо покращення ефективності регіональної системи екологічного моніторингу, який побудований на комплексному використанні організаційної складової та апаратно-програмного комплексу з використанням теорії штучного інтелекту. Варто підкреслити те, що в Україні на даний час немає централізованого порталу в системі моніторингу екологічної інформації. Тому актуально створити централізований ресурс, для систематизації даних, формування бази знань та наглядного відображення проблем регіону.

Науковим завданням є розробка найбільш адекватної моделі представлення знань в регіональній інтелектуалізованій системі екологічного моніторингу.

Нечітка *N*-арна неоднорідна семантична мережа. Нехай дана *N*-арна неоднорідна семантична мережа $S=(V, D, \Gamma)$, де V – множина вершин (понять) мережі потужності $|V|=n$; D – множина дуг (відносин між поняттями) мережі потужності $|D|=m$; $\Gamma=(\Gamma_V, \Gamma_D)$ – множина ваг вершин і дуг мережі відповідно, потужністю

$$|\Gamma|=|\Gamma_V \cup \Gamma_D|=n+m, \quad n,m \in N,\ \gamma_i \in \Gamma_V,\ i=\overline{1,n};\ \gamma_j \in \Gamma_D,\ j=\overline{n+1,m}.$$

Сучасна теорія навантажених орграфів розроблена для випадку коли $|\Gamma|=|\Gamma_D|=m, \quad m \in N,$ тобто враховуються тільки ваги дуг, а $\Gamma_V=\varnothing$ [1...3]. Таким чином, виникла теоретична проблема математичної формалізації *N*-арної неоднорідної семантичної мережі $S=(V, D, \Gamma)$. Дослідження показали, що найбільш ефективно ця проблема вирішена в роботах [4...8]. Запропоновано підхід щодо розв’язання даної проблеми, який базується на введеному понятті «елементарна семантична мережа 1-го роду», як мережі із двох вершин і дуги між ними з відповідними вагами.

Було введено поняття «наведена елементарна семантична мережа 1-го роду» з вагою дуги γ , що відповідає елементарній семантичній мережі 1-го роду [8]

$$\gamma = \Theta_k(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{12}) \equiv m\,,\; m^T = (m_0, m_1)\,, \tag{1}$$

де $\Theta_k(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{12}) \equiv m$ – предикат, що приймає значення нечіткого логічного вектора.

Область значення предиката розширена від традиційних 0 або 1 до нечіткого двохкомпонентного логічного вектора [9] $m_{ijk}^T = (m_{0ijk}, m_{1ijk})$, при цьому якщо $m_{ijk}^T = (0, 1)$, то вектор приймає значення «істинно», а якщо $m_{ijk}^T = (1, 0)$, то – «хибно».

Крім цього повинні бути здійсненні умови

$$0 \ge m_{0ilk}\,,\; m_{1ilk \ge} 1\,,\; m_{0ijk} + m_{0ilk} = 1\,. \tag{2}$$

Заперечення вектора $\overline{m_{ijk}}$ відповідає перестановці його елементів $\overline{m}_{ilk}^T = (m_{1ijk}, m_{0ilk})$. Мірою нечіткості логічного вектора m_{ilk} служить ентропія

$$S(m_{ijk}) = -m_{0ijk}\log_2 m_{0ijk} - m_{1ilk}\log_2 m_{1ijk}\,.$$

Мірою нечіткості семантичної мережі є величина

$$S(M) = \sum_{i,j} S(m_{ijk})\,, \text{ де } m_{ijk} \in M\,,\; i = \overline{1,l}, \quad j = \overline{1,c}\,,\; i, j \in N\,.$$

Кожній логічній операції між векторними змінними зіставляється тензор 3-го рангу. При цьому тензори зберігають той вид, що вони мали у векторному представленні традиційної чіткої логіки. Це дозволяє однозначно описати операції над нечіткими логічними змінними. Крім того, між операціями зберігаються ті ж зв'язки, які мали місце в чіткій логіці. Істотна зручність векторного представлення полягає в тому, що операції над логічними змінними можуть бути представлені в матричному виді [8].

Пропонований підхід відрізняється від існуючої теорії нечітких предикатів тим, що замість значення нечіткого логічного вектора предикату ставиться у відповідність нечітка семантична мережа. Це дозволило при логічних висновках об'єднати переваги теорії предикатів, векторного представлення логічної змінної й теорії матриць.

В роботі [8] введено поняття «елементарна семантична мережа 2-го роду»

$$S = (V, D,\; \Gamma)\,,\; |V| = n\,,\; |D| = m,\; |\Gamma| = |\Gamma_V \cup \Gamma_D| = n + m, \quad n, m \in N\,,$$

як мережа, що у результаті перетворень (1), (2) може стати так називаною «приведеною елементарною семантичною мережею 2-го роду» $S^* = (V^*, D^*,\; \Gamma^*)$, для якої

$$|V| > |V^*| > 2\,; \quad |D| > |D^*| > 1\,; \quad |\Gamma| > |\Gamma^*| > 3\,. \tag{3}$$

Таким чином, запропонований підхід дозволив розв'язати теоретичну проблему математичної формалізації *N*-арної неоднорідної семантичної мережі.

Модель неоднорідної семантичної мережі. Найбільш перспективною, на наш погляд, є, розроблена модель, що поєднує переваги теорій предикатів, нечіткої логіки й семантичних мереж [4...8, 10].

Визначення. Нехай змінні $\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_{n+m}$ приймають значення, що належать довільним множинам: $\gamma_i \in \Gamma_V$, $i = 1, 2, ..., n$, $\gamma_j \in \Gamma_D$, $j = n+1, n+2, ..., m$, тоді функція $y = \Theta(\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_{n+m})$, якій можна поставити у відповідність нечітку семантичну мережу $S = (V, D, \Gamma)$, тобто $\Theta(\gamma_1, \gamma_2, ..., \gamma_{n+m}) \equiv S$, де V – множина вершин (понять) мережі потужності $|V| = n$; D – множина дуг (відносин між поняттями) мережі потужності $|D| = m$; $\Gamma = (\Gamma_V, \Gamma_D)$ – множина ваг вершин і дуг мережі відповідно, потужністю

$\left|\Gamma\right| = \left|\Gamma_V \cup \Gamma_D\right| = n+m, \quad n,m \in N$, $\quad \gamma_i \in \Gamma_V$, $i = \overline{1,n}$; $\quad \gamma_j \in \Gamma_D$, $j = \overline{n+1,m}$ називається n+m-місцевим предикатом на нечіткій семантичній мережі.

Тому що будь-яку нечітку семантичну мережу $S = (V, D, \Gamma)$ можна представити навантаженим орграфом у вигляді наведеної елементарної семантичної мережі 2-го роду, то вищевказану мережу можна описати однією й тільки однією матрицею суміжності M. Таким чином, математична формалізація даного твердження має вигляд

$$\forall\, \gamma_i \in V, i = \overline{1,n}, \gamma_j \in D,\ j = \overline{n+1,m} \Rightarrow \exists$$

$$\Theta_k(x_1, x_2, ..., x_m) \equiv \begin{Vmatrix} m_{11k} & m_{12k} & ... & m_{1ck} \\ m_{21k} & m_{22k} & ... & m_{21k} \\ \vdots & & ... & \vdots \\ m_{l1k} & m_{l2k} & ... & m_{lck} \end{Vmatrix}. \qquad (4)$$

Область значень елементів матриці суміжності розширена від традиційних 0 або 1 до нечіткого двохкомпонентного логічного вектора $m_{ijk}^T = (m_{0ijk}, m_{1ijk})$.

Отже, логіка нечітких предикатів розвинена у векторно-матричному представленні. Предикат представимо як векторне поле нечітких змінних над заданою множиною термів. Досліджуємо операції над предикатами, розробимо варіант побудови нечіткого висновку на основі правил, сформульованих у вигляді відносин між предикатами. Дамо визначення й визначимо метод обчислення нечітких кванторів $\forall$ і $\exists$.

У роботі [9] було розвинене матричне представлення нечіткої логіки. Логічні змінні представлені $2D$ векторами $m^T = (m_0, m_1)$ компонента, яких задовольняють умовам: $0 \geq m_0,\ m_1 \leq 1,\ m_0 + m_1 = 1$. Заперечення $\overline{m}$ вектора m еквівалентно перестановці його компонент: $\overline{m}^T = (m_1, m_0)$. Простір нечітких векторів позначаємо символом F. Мірою нечіткості логічного вектора $m \in F$ служить ентропія

$$S(m) = -m_0 \log_2 m_0 - m_1 \log_2 m_1 .$$

Кожній логічній операції P між векторними змінними m, y зіставляється тензор 3-го рангу $T^{(P)}$, що реалізує відображення $m \otimes y \xrightarrow{P} z$ (або $F \otimes F \xrightarrow{P} F$). При цьому тензори $T^{(P)}$ зберігають той вид, що вони мали у векторному представленні «чіткої» логіки. Це дозволяє однозначно інтерпретувати операції над нечіткими логічними змінними. Крім того, між операціями зберігаються ті ж зв'язки, які мали місце в «чіткій» логіці, наприклад, правила де Моргана. Однак алгебраїчні властивості деяких операцій над «істотно нечіткими» змінними, такі як ідемпотентність, дистрибутивність, закон виключення третього й закон протиріччя, у нечіткій логіці не виконуються. При цьому вони залишаються справедливими для випадку, коли логічні змінні приймають чіткі значення, що збігаються з векторами «базису» $\left(e^{(0)}\right)^T = (1,0)$ або $\left(e^{(1)}\right)^T = (0,1)$, що мають зміст «неправда» та «істина» відповідно.

Велика зручність векторного представлення полягає в тому, що операції над логічними змінними можуть бути представлені в матричному виді. Основна перевага матричного представлення нечіткої логіки складається в можливості відомості задач одержання логічних висновків до рішення лінійних алгебраїчних рівнянь. В [9] це продемонстровано на прикладах нечіткого правила «модус поненс» та «методу резолюцій».

Проаналізуємо матричну модель нечітких предикатів.

Як відомо, мова предикатів значно розширює можливості рішення задач у порівнянні з логікою висловлень, що розглядалася в [9]. «Чіткі», тобто класичні предикати визначаються як функції на множині «термів» M, що приймають значення в булевому просторі $B = \{0,1\}$.

Так, якщо, $M = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\}$, то прикладом одномісного предиката $P(m)$, де $m \in M$, може служити функція

$$\begin{array}{cccccc} m & \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \gamma_5 \\ P(m) & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}, \qquad (5)$$

Аналогічно визначаються двомісні, тримісні й т.п. предикати. Наприклад, двомісний предикат $P(m, y)$, $m \in M$, $y \in N$ визначений на множині $M \otimes N$.

Нечіткий предикат $P(m)$ визначаємо як функцію, задану на множині M і приймаючого значення в просторі векторних нечітких змінних F, яке було визначено вище. Отже, областю значень предиката є нечіткі логічні вектори, $P(m) \in F$ або $[P(m)]^T = (P_0(m), P_1(m))$, причому для всіх m справедливо

$$0 \le P_0(m),\ P_1(m) \le 1, \quad P_0(m) + P_1(m) = 1. \qquad (6)$$

Таким чином, нечіткий предикат $P(m)$ задає на M деяке векторне поле (Рис. 1).

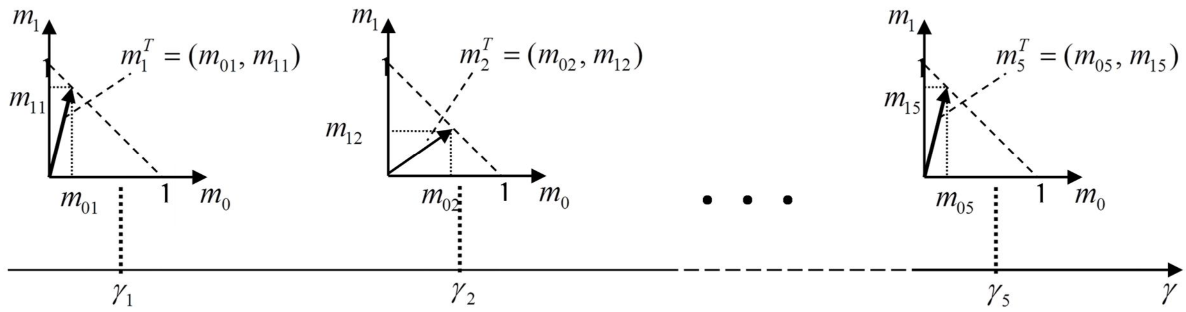

Рис. 1. Приклад нечіткого предиката $P(m)$ як векторного поля нечітких змінних, заданого на множині $M = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\}$.

Тому що предикати є логічними змінними, то до них можуть бути застосовані всі нечіткі логічні операції. Це дозволяє з деяких заданих на M предикатів будувати нові, більш складні, предикати, що дає можливість розширити на область предикатів правила логічного висновку.

Правило «модус понен» можна проілюструвати наступним простим прикладом. Нехай між предикатами $P(m), Q(m), R(m)$, заданими на M, існує зв'язок (у додатках зв'язку такого роду називають «правилами»)

$$P(m) \to Q(m) = R(m). \qquad (7)$$

Тут предикат $R(m)$ можна інтерпретувати як ступінь істинності того, що «із $P(m)$ треба $Q(m)$». Перепишемо (7) у матричному виді

$$D\left(\overline{P(m)}\right)Q(m) = R(m) \text{ або } \begin{pmatrix} P_1(m) & 0 \\ P_0(m) & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} Q_0(m) \\ Q_1(m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_0(m) \\ R_1(m) \end{pmatrix}. \qquad (8)$$

Виходячи з вищесказаного розроблена модель представлення знань (Рис. 2).

Висновок. Дослідження показали що однією з найбільш важливих теоретичних проблем, з якою доводиться зіштовхуватися при моделюванні знань у вигляді *N*-арної неоднорідної семантичної мережі є її формальне представлення. Сучасна теорія навантажених орграфів, яка найбільш за всього підходить для цього, розроблена для випадку, коли враховуються тільки ваги дуг, а ваги вершин відсутні. Запропонований підхід на основі використання елементарних семантичних мереж 1-го та 2-го роду дозволів вирішити проблему математичної формалізації *N*-арної неоднорідної семантичної мережі.

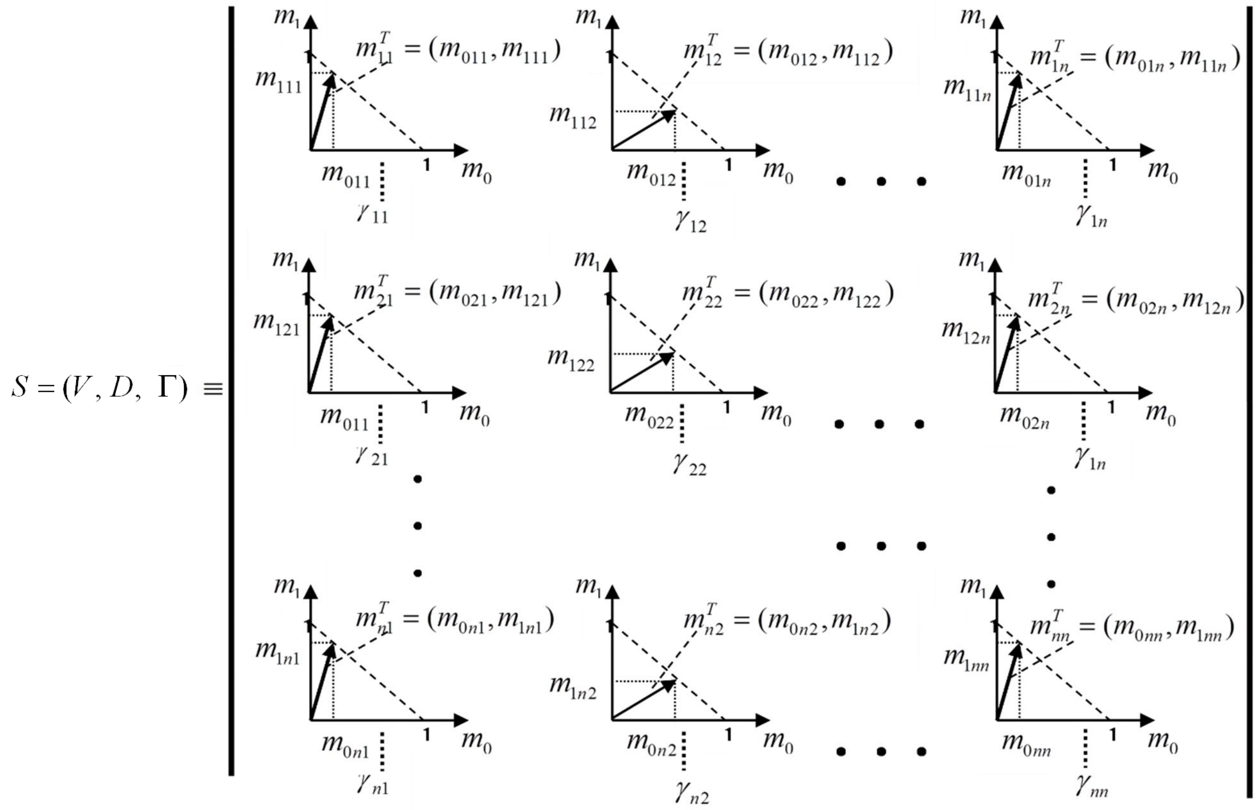

Рис. 2. Матриця суміжності *N*-арної неоднорідної семантичної мережі $S = (V, D, \Gamma)$

Література

1. Басакер Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати. – Москва : Наука, 1973. – 368 с.
2. Белов В. В. Теория графов / В. В. Белов, Е. М. Воробьев, В. Е. Шаталов. – Москва : Высшая школа, 1976. – 392 с.
3. Зыков А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков. − Москва : Наука, 1987. – 384 с.
4. Оксіюк О. Г. Метод послідовного зменшення норми матриці складності неоднорідної семантичної мережі / О. Г. Оксіюк, І. Ю. Кравченко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2011. – Вип. 1(27). – С. 151-153.
5. Кравченко Ю. В. Підхід щодо представлення знань в інформаційній системі / Ю. В. Кравченко, О. Г. Оксіюк // Військово-технічний збірник. – 2011. – № 1(4). – С. 194-197.
6. Оксіюк О. Г. Підхід щодо оцінки структурної складності семантичної мережі / О. Г. Оксіюк, Ю. В. Волосюк // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – № 1(25). – С. 128-129.
7. Кравченко Ю. В. Математическая модель сложной социальной системы / Ю. В. Кравченко, А. А. Лобанов, А. Г. Оксиюк // Матер. міжнар. наук. конф. «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI’2009)». – Херсон : ХНТУ, 2009. – С. 48-50.
8. Кравченко Ю. В. Модель представления знаний на основе предикатов и нечетких семантических сетей / Ю. В. Кравченко, А. Г. Оксиюк, В. Н. Андрущенко // Матер. міжнар. наук. конф. «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI’2010)». – Херсон : ХНТУ, – С. 341-342.
9. Mizraji E. Vector logic: The matrix-vector representation of logical calculus / E. Mizraji // Fuzzy Sets and Systems. – 1992. –V. 50. – P.173-185.
10. Zadeh L. A. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages / L. A. Zadeh // Computer and Mathematics. – 1983. – №9. – P. 149-184.

Дата надходження в редакцію: 24.12.2014 р. Рецензент: д.т.н., проф. О. В. Барабаш