

РОЗРОБКА N-НАПРАВЛЕНОЇ ДИСКРЕТНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

Вперше на основі двонаправленої асоціативної пам'яті запропонована архітектура та алгоритми функціонування N-направленої дискретної нейромережевої асоціативної пам'яті. Нова пам'ять здатна відновлювати по вхідному вектору, що подається на будь-який з її вхідних шарів нейронів, безліч з N зображень, які асоціативні до вхідної інформації. Це стає можливим завдяки тому, що архітектура класичної двонаправленої асоціативної пам'яті, яка складається з двох сенсорних шарів елементів, нейрони яких пов'язані між собою парами зважених двонаправлених зв'язків з відповідними ваговими коефіцієнтами, перебудовується шляхом введення в її структуру додаткових (N-1) сенсорних шарів нейронів, що пов'язані з першим шаром сенсорних елементів парами двонаправлених зважених зв'язків з відповідними ваговими коефіцієнтами.

Ключові слова: двонаправлена асоціативна пам'ять, N-направлена дискретна нейромережева асоціативна пам'ять.

A.Y. ZAKOVOROTNYI

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"

DEVELOPMENT OF N-DIRECTIONAL DISCRETE ASSOCIATIVE MEMORY

For the first time on the basis of bidirectional associative memory proposed architecture and algorithms of discrete N-directional associative memory neural network. The new memory is capable of restoring the input vector to be fed to any of its input layer neurons, the set of N images that are associative input information. This is possible thanks to the fact that the architecture of classical bidirectional associative memory, which consists of two sensor layers of elements, the neurons are connected to each other pairs of weighted bi-directional communication with the respective weights, rebuilt by the introduction into its structure more (N-1) sensory layers of neurons associated with the first layer of the sensor elements in pairs suspended bidirectional links with relevant weights.

Keywords: bidirectional associative memory, N-directional discrete neural associative memory.

Постановка задачі та аналіз літератури

Для вирішення задач знаходження асоціативних образів на даний час існує безліч різноманітних методів та алгоритмів [1 – 6]. У зв'язку з цим в теорії штучного інтелекту робляться спроби створення універсальних підходів, що дозволяють вирішувати широкі класи задач пошуку і запам'ятовування асоціативної інформації. Один з таких підходів пов'язаний з використанням штучних нейронних мереж. Їх ефективне застосування для вирішення різних завдань багато в чому ґрунтується на тому, що традиційні труднощі вирішення різноманітних завдань полегшені застосуванням універсальних алгоритмів навчання нейронних мереж на навчальних вибірках [7 – 9].

Звичайна нейронна мережа, наприклад, перцептрон [5, 7] реалізує відображення $y^k = f(x^k)$, де $y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k)$ – вихідний вектор нейронної мережі для k-го вхідного вектору мережі $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$, $k = \overline{1, p}$; p – число пар векторів (x^k, y^k) , $x^k \in R^n$, $y^k \in R^m$, й може розглядатися як асоціативна пам'ять, яка вхідному вектору x^k ставить у відповідність вихідний вектор y^k . Однак нейронні мережі типу перцептрон, Хебба, Хеммінга та інші [8, 9] неспроможні вектору y^k поставити у відповідність асоціативний вектор x^k . Цей недолік усунутий у нейронних мережах двонаправлена асоціативна пам'ять (ДАП) [10 – 14].

Двонаправлена асоціативна пам'ять складається з двох сенсорних шарів нейронів, пов'язаних між собою парами двонаправлених зважених зв'язків. Зображення (або n-мірні або m-мірні вхідні вектори) можуть подаватися відповідно на входи X- або Y-елементів. При цьому не передбачається подача зображень на обидва шари елементів одночасно. Якщо вагова матриця для сигналів, що посилюються з X-шару елементів в Y-шар, є

$$W = \begin{pmatrix} w_{11} & \dots & w_{1k} & \dots & w_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{j1} & \dots & w_{jk} & \dots & w_{jm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & \dots & w_{nk} & \dots & w_{nm} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

то вагова матриця для сигналів від Y-елементів в X-шар має вигляд $W_1 = W^T$.

Мережа здатна запам'ятовувати пари асоційованих один одному образів $S^p = (s_1^p, \dots, s_n^p)$, $T^p = (t_1^p, \dots, t_m^p)$ з деяких заданих множин образів $S = \{S^1, \dots, S^p, \dots, S^L\}$, $T = \{T^1, \dots, T^p, \dots, T^L\}$, де L – число асоційованих пар.

Процес навчання ДАП з біполярними нейронами полягає в попередньому налаштуванні ваг зв'язків

між X - та Y -нейронами, що задаються елементами матриці (1) відповідно до формули

$$w_{ij} = \sum_{p=1}^L S_i^p t_i^p, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Динаміка ДАП в режимі визначення асоціативних зображень є ітераційною. Процес зміни вихідних сигналів нейронів кожного шару ДАП здійснюється синхронно, при цьому сигнали посилаються з шару в шар послідовно, а не одночасно в обох напрямках. При біполярних вхідних векторах функції активації $f_p(U_{\text{вх.}p})$ для елементів X - й Y -шару задаються виразом

$$U_{\text{вих.}p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } U_{\text{вх.}p}(t) > \theta_p, \\ U_{\text{вих.}p}(t), & \text{якщо } U_{\text{вх.}p}(t) = \theta_p, \\ -1, & \text{якщо } U_{\text{вх.}p}(t) < \theta_p, \end{cases} \quad (3)$$

де θ_p – поріг p -го елемента ДАП, $p = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+m$.

З виразу (3) виходить, що якщо вхідний сигнал елемента точно дорівнює пороговому значенню, то функція активації залишає на виході нейрона попереднє значення вихідного сигналу. У зв'язку з цим початкова активація нейронів зазвичай проводиться нульовими вхідними сигналами. Функціонування мережі може починатися з подачі зображення (вхідних сигналів) на будь-який з шарів ДАП.

ДАП може запам'ятовувати пари асоціативних зображень, а при подачі представника пари на відповідний вхідний шар – відновлювати та видавати на іншому шарі асоціативне йому зображення. Таким чином ДАП для кожного вхідного зображення в пам'яті зберігає лише одне асоціативне йому вихідне зображення, тобто відсутня можливість зберігання та відновлення з пам'яті N асоціативних вхідному вектору зображень.

Постановка задачі

Розробка нейромережевої N -направленої асоціативної пам'яті, що володіє можливістю зберігання та відновлення зі своєї пам'яті N асоціативних вхідному вектору зображень.

Розробка нейромережевої N -направленої асоціативної пам'яті

Завдання вирішується завдяки тому, що архітектура класичної двонаправленої асоціативної пам'яті, яка складається з двох сенсорних шарів елементів, нейрони яких зв'язані між собою парами зважених двонаправлених зв'язків з відповідними ваговими коефіцієнтами, перебудовується шляхом введення в її структуру додаткових $(N-1)$ сенсорних шарів нейронів (рис. 1), які пов'язані з першим шаром сенсорних елементів парами двонаправлених зважених зв'язків з відповідними ваговими коефіцієнтами. У результаті додавання в структуру нейронної мережі перерахованих вище сенсорних шарів нейронів досягається можливість зберігання та відновлення з пам'яті множинних асоціацій. Це стає можливим завдяки тому, що любий вхідний сенсорний шар нейронів пов'язаний одразу з N шарами елементів, що дозволяє одному вхідному зображенню асоціювати N вихідних [15].

Пам'ять складається з вхідного сенсорного шару нейронів X_i ($i = 1, \dots, n$) та N вихідних шарів $Y_{q_1}^1$ ($q_1 = 1, \dots, g_1$), $Y_{q_2}^2$ ($q_2 = 1, \dots, g_2$), ..., $Y_{q_{N-1}}^{N-1}$ ($q_{N-1} = 1, \dots, g_{N-1}$), $Y_{q_N}^N$ ($q_N = 1, \dots, g_N$), елементи яких пов'язані з відповідними їм нейронами вхідного сенсорного X -шару парами двонаправлених зважених зв'язків з ваговими коефіцієнтами $W_{iq_1}^{11}$, $W_{q_1i}^{12}$ ($i = 1, \dots, n$; $q_1 = 1, \dots, g_1$), $W_{iq_2}^{21}$, $W_{q_2i}^{22}$ ($i = 1, \dots, n$; $q_2 = 1, \dots, g_2$), ..., $W_{iq_{N-1}}^{(N-1)1}$, $W_{q_{N-1}i}^{(N-1)2}$ ($i = 1, \dots, n$; $q_{N-1} = 1, \dots, g_{N-1}$) та $W_{iq_N}^{N1}$, $W_{q_Ni}^{N2}$ ($i = 1, \dots, n$; $q_N = 1, \dots, g_N$), де верхній індекс матриць вагових коефіцієнтів – це номер вихідного шару, з яким з'єднує матриця та номер самої матриці відповідно. Перший верхній індекс показує, що нейрони вхідного шару з'єднані з нейронами відповідного вихідного шару, другий: 1, коли матриця зв'язків передає сигнали нейронів X -шару нейронам відповідного вихідного шару, й 2, навпаки, коли матриця зв'язків передає сигнали вихідного шару нейронам X -шару. Перші нижні індекси вказують на нейрони, що видають сигнали, а другі – на нейрони, що приймають сигнали.

Розроблена асоціативна пам'ять функціонує відповідно до двох алгоритмів: навчання та функціонування. Алгоритм навчання зводиться до визначення навчального набору зображень й матриць ваг зв'язків між шарами нейронів: X , Y^1 , Y^2 , ..., Y^N , за допомогою співвідношень (1) і (2). Оскільки люба пара шарів X та Y^j ($j = \overline{1, N}$) мають архітектуру двонаправленої асоціативної пам'яті, то їх навчання аналогічно класичному алгоритму навчання ДАП. Послідовне застосування класичного алгоритму навчання ДАП до шарів нейронів X та Y^1 , X та Y^2 , ..., X та Y^N дозволяє отримати всю безліч асоціативних зображень S^V , S^{V1} , S^{V2} , ..., S^{VN} , де S^V – вхідне зображення на X -шарі, S^{Vd} ($d = 1, 2, \dots, N$) – зображення на виходах елементів, відповідно шарів Y^1 , Y^2 , ..., Y^N нейронів.

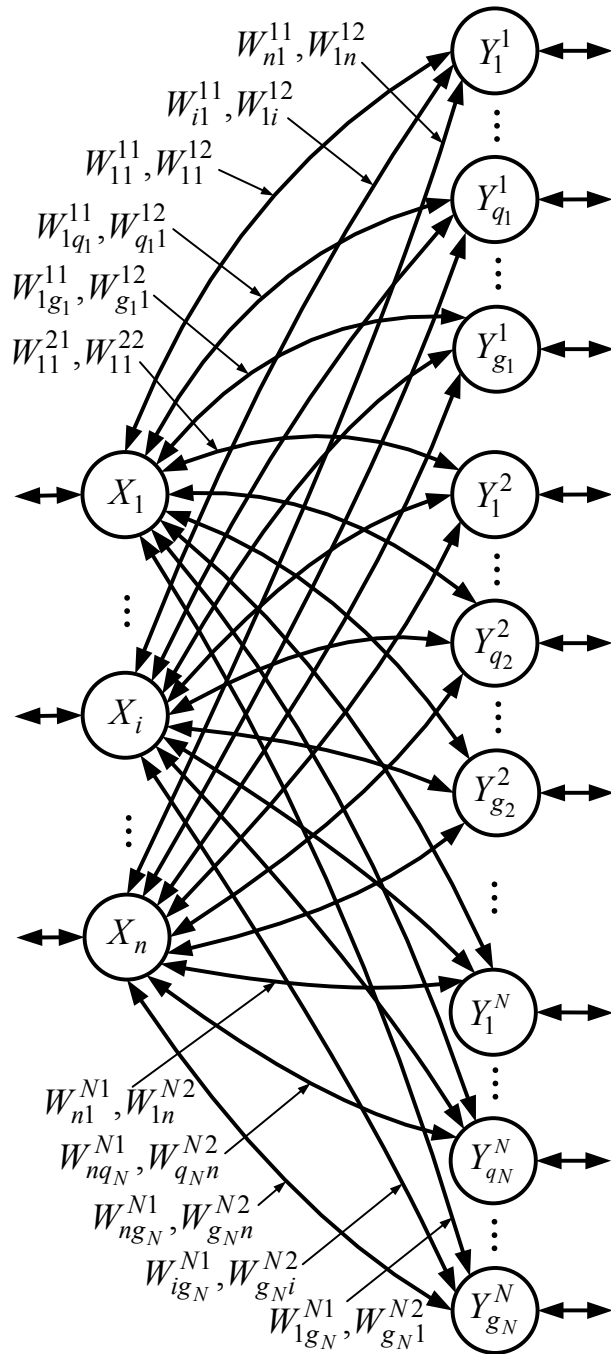


Рис. 1. Нейромережева N -направлена асоціативна пам'ять

В алгоритмі функціонування N -направленої асоціативної пам'яті прийняті наступні позначення:

r – максимальне число наборів асоціативних зображень;

n – число бінарних компонентів у вхідному векторі;

g_k – число бінарних компонентів у k -му вихідному векторі $Y_{q_k}^k$ -шару ($k = \overline{1, N}$) нейронів;

L – число наборів асоціативних зображень, що запам'ятовуються;

$W_{iq_k}^{k1}, W_{q_k i}^{k2}$ ($i = \overline{1, n}; k = \overline{1, N}; q_k = \overline{1, g_k}$) – ваги зв'язків від елементів вхідного шару до елементів k -го вихідного шару;

$U_{\text{вх.}X_i}$ та $U_{\text{вих.}X_i}$ ($i = 1, \dots, n$) – відповідно вхідний та вихідний сигнал i -го елемента вхідного шару нейронної мережі;

$U_{\text{вх.}Y_{q_k}^k}$ та $U_{\text{вих.}Y_{q_k}^k}$ ($q_k = \overline{1, g_k}$) – відповідно вхідний та вихідні сигнали q -го елемента k -го вихідного шару нейронної мережі;

шару нейронної мережі;

$(S_1, S_1^1, \dots, S_1^{N-1}, S_1^N), (S_2, S_2^1, \dots, S_2^{N-1}, S_2^N), \dots, (S_r, S_r^1, \dots, S_r^{N-1}, S_r^N)$ – набори асоціативних

зображень, які запам'ятовуються N -направленою асоціативною пам'яттю;

$S_v = (S_{v1}, \dots, S_{vn})$ ($v = 1, \dots, n$) – бінарний вхідний вектор v -го набору асоціативних зображень.

Алгоритм роботи N -направленої асоціативної пам'яті в режимі визначення асоціативних зображень, передбачає виконання наступних кроків:

Крок 1. Задається початковий час: $t = 0$. Ініціюються нульовими вхідними сигналами всі нейрони мережі:

$$U_{\text{вх.}X_i}(0) = 0; \quad U_{\text{вих.}X_i}(0) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}(0)) = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}Y_q^1}(0) = 0; \quad U_{\text{вих.}Y_q^2}(0) = 0; \quad \dots; \quad U_{\text{вх.}Y_h^{N-1}}(0) = 0; \quad U_{\text{вих.}Y_l^N}(0) = 0;$$

$$U_{\text{вих.}Y_q^1}(0) = f_q(U_{\text{вх.}Y_q^1}(0)) = 0; \quad U_{\text{вих.}Y_k^2}(0) = f_k(U_{\text{вх.}Y_q^1}(0)) = 0;$$

.....

$$U_{\text{вих.}Y_h^{N-1}}(0) = f_h(U_{\text{вх.}Y_h^{N-1}}(0)) = 0; \quad U_{\text{вих.}Y_l^N}(0) = f_l(U_{\text{вх.}Y_l^{N3}}(0)) = 0, \quad q = \overline{1, g}; \quad h = \overline{1, m}; \quad l = \overline{1, d}; \quad k = \overline{1, p}.$$

Крок 2. На входи нейронів X -шару подається зображення $S_v = (S_{v1}, \dots, S_{vn})$. Для даного вхідного зображення $S_v = (S_{v1}, \dots, S_{vn})$ виконуються кроки 3 – 8 алгоритму, коли на кожному з k шарів Y -нейронів отримується одне зображення, асоціативне вхідному, де $k = \overline{1, N}$.

Крок 3. Ініціюються ваги зв'язків $W_{iq_k}^{k1}$, $W_{iq_k}^{k2}$ ($k = \overline{1, N}$; $i = \overline{1, n}$; $q_k = \overline{1, g_k}$). Задається час: $t = t_0^{(0+k)}$.

Крок 4. Задаються вхідні сигнали нейронів X -шарів мережі

$$U_{\text{вх.}X_i}(0) = S_{vi}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Задається час $t = t_1^{(0+k)}$ та обчислюються вихідні сигнали X -елементів:

$$U_{\text{вих.}X_i}(t_1^{(0+k)}) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}(t_0^{(0+k)})), \quad i = \overline{1, n}.$$

Крок 5. Доки не встановляться вихідні сигнали всіх X - та $Y_{q_k}^k$ -нейронів, виконуються кроки 6 – 8 алгоритму.

Крок 6. Адаптується активність елементів $Y_{q_k}^k$ -шару. Обчислюються вхідні та вихідні сигнали $Y_{q_k}^k$ -елементів:

$$U_{\text{вх.}Y_{q_k}^k}(t_1^{(0+k)}) = \sum_{i=1}^n W_{iq_k}^{k1} U_{\text{вих.}X_i}(t_1^{(0+k)}), \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

$$U_{\text{вих.}Y_{q_k}^k}(t_2^{(0+k)}) = f_{q_k}(U_{\text{вх.}Y_{q_k}^k}(t_1^{(0+k)})), \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

Вихідні сигнали $Y_{q_k}^k$ -нейронів посиляються на входи елементів X -шару.

Крок 7. Адаптується активність елементів X -шару. Обчислюються вхідні та вихідні сигнали X -елементів.

$$U_{\text{вх.}X_i}(t_2^{(0+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k i}^{k2} U_{\text{вих.}Y_{q_k}^k}(t_2^{(0+k)}), \quad i = \overline{1, n}.$$

$$U_{\text{вих.}X_i}(t_3^{(0+k)}) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}(t_2^{(0+k)})), \quad i = \overline{1, n}.$$

Вихідні сигнали X -нейронів посиляються на входи елементів $Y_{q_k}^k$ -шару та обчислюються вхідні та вихідні сигнали $Y_{q_k}^k$ -елементів:

$$U_{\text{вх.}Y_{q_k}^k}(t_3^{(0+k)}) = \sum_{i=1}^n W_{iq_k}^{k1} U_{\text{вих.}X_i}(t_3^{(0+k)}), \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

$$U_{\text{вих.}Y_{q_k}^k}(t_4^{(0+k)}) = f_{q_k}(U_{\text{вх.}Y_{q_k}^k}(t_3^{(0+k)})), \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

Крок 8. Перевіряється тест на збіжність. Порівнюються вихідні сигнали X -нейронів $U_{\text{вих.}X_i}(t_3^{(0+k)})$ та $U_{\text{вих.}X_i}(t_1^{(0+k)})$ $i = \overline{1, n}$, відповідно, а також $Y_{q_k}^k$ -нейронів $U_{\text{вих.}Y_{q_k}^k}(t_2^{(0+k)})$, та $U_{\text{вих.}Y_{q_k}^k}(t_4^{(0+k)})$ $q_k = \overline{1, g_k}$, відповідно, які отримані на поточній та попередній ітераціях. Якщо не виконана хоч одна рівність

$$U_{\text{вих.}X_i}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{вих.}X_i}(t_1^{(1+k)}), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вих.}Y_{qk}^k}(t_2^{(1+k)}) = U_{\text{вих.}Y_{qk}^k}(t_4^{(1+k)}), \quad q_k = \overline{1, g_k},$$

то перехід до кроку 6 алгоритму, якщо $k+1 \leq N$, то блокуються ваг зв'язку W_{iqk}^1, W_{iqk}^{1T} ($i = \overline{1, n}; q_k = \overline{1, g_k}$), $k = k+1$ та перехід до кроку 3, в іншому випадку – до кроку 9.

Крок 9. Останов.

Розглянемо приклад навчання асоціативної пам'яті з біполярними нейронами для запам'ятовування двох наборів асоціативних зображень $(S_1, S_1^1, S_1^2, S_1^3)$ та $(S_2, S_2^1, S_2^2, S_2^3)$, де S_1, S_2 – вхідні зображення, S_1^1, S_1^2, S_1^3 та S_2^1, S_2^2, S_2^3 – асоціативні зображення для першого та другого вхідних зображень відповідно (рис. 2), та описуються двійковими векторами:

$$S_1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1),$$

$$S_1^1 = (1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1),$$

$$S_1^2 = (1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1),$$

$$S_1^3 = (1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) \text{ та}$$

$$S_2 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1),$$

$$S_2^1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1),$$

$$S_2^2 = (1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1),$$

$$S_2^3 = (1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1).$$

При цьому матриці вагових коефіцієнтів, що розраховуються за допомогою формули (1), представлені в таблицях 1 – 3.

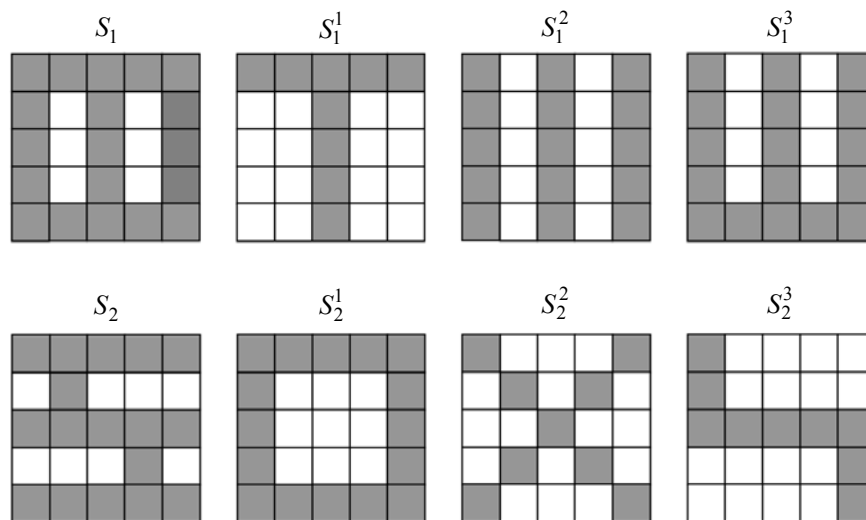


Рис. 2. Набор асоціативних зображень

Перевірка працездатності роботи N -направленої асоціативної пам'яті. При поданні на вхід вектору $S_1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, асоційованого вектору S_1^1 отримаємо:

$$S_1 W_{iq1}^1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) \cdot W_{iq1}^1 = \\ = (30, 30, 30, 30, 30, -14, -28, 4, -28, -14, -14, -28, 14, -28, -14, -14, -28, 14, -28, -14, -14, -14, 30, -14, -14).$$

Використовуючи функцію активації (2) при нульовому порозі, визначаємо вектор $S_1^1 = (1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1)$.

При поданні на вхід вектору $S_1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, асоційованого вектору S_2^1 отримаємо:

$$S_1 W_{iq2}^{21} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) \cdot W_{iq2}^{21} = \\ = (30, -30, 18, -30, 30, 18, -20, 18, -20, 18, 18, -30, 30, -30, 18, 18, -20, 18, -20, 18, 30, -30, 18, -30, 30).$$

Використовуючи функцію активації (2) при нульовому порозі, визначаємо вектор $S_2^1 = (1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1)$.

Матриця вагових коефіцієнтів $W_{iq_1}^1$ між вхідним та першим вихідним шаром нейронів

N-направленої асоціативної пам'яті.

2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	0	-2	-2
0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	0	-2	-2
0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	0	-2	-2
-2	-2	-2	-2	-2	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	-2	0	0
0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	0	-2	-2
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
0	0	0	0	0	2	0	-2	0	2	2	0	-2	0	2	2	0	-2	0	2	2	2	0	2	2
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
0	0	0	0	0	2	0	-2	0	2	2	0	-2	0	2	2	0	-2	0	2	2	2	0	2	2
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	0	-2	-2
-2	-2	-2	-2	-2	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	-2	0	0
0	0	0	0	0	-2	0	0	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	0	-2	-2
0	0	0	0	0	2	0	-2	0	2	2	0	-2	0	2	2	0	-2	0	2	2	2	0	2	2
-2	-2	-2	-2	-2	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	-2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0
2	2	2	2	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	2	0	0

Таблиця 2

Матриця вагових коефіцієнтів $W_{iq_2}^1$ між вхідним та другим вихідним шаром нейронів

N-направленої асоціативної пам'яті.

2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
0	0	0	0	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0
0	0	-2	0	0	-2	2	-2	2	-2	-2	0	0	0	-2	-2	2	-2	2	-2	0	0	-2	0
0	0	2	0	0	2	-2	2	-2	2	2	0	0	0	2	2	-2	2	-2	2	0	0	2	0
-2	2	0	2	-2	0	0	0	0	0	0	2	-2	2	0	0	0	0	0	-2	2	0	2	-2
0	0	2	0	0	2	-2	2	-2	2	2	0	0	0	2	2	-2	2	-2	2	0	0	2	0
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
0	0	-2	0	0	-2	2	-2	2	-2	-2	0	0	0	-2	-2	2	-2	2	-2	0	0	-2	0
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
0	0	2	0	0	2	-2	2	-2	2	2	0	0	0	2	2	-2	2	-2	2	0	0	2	0
2	2	0	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0	2	2	0	2	2
0	0	2	0	0	2	-2	2	-2	2	2	0	0	0	2	2	-2	2	-2	2	0	0	2	0
0	0	-2	0	0	-2	2	-2	2	-2	-2	0	0	0	-2	-2	2	-2	2	-2	0	0	-2	0
0	0	2	0	0	2	-2	2	-2	2	2	0	0	0	2	2	-2	2	-2	2	0	0	2	0
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2
2	-2	0	-2	2	0	0	0	0	0	0	-2	2	-2	0	0	0	0	0	2	-2	0	-2	2

Матриця вагових коефіцієнтів $W_{iq_3}^1$ між вхідним та третім вихідним шаром нейронів

N-направленої асоціативної пам'яті.

2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	2
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	2
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	2
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	2
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	2
0	0	2	0	2	0	0	2	0	0	0	-2	0	-2	0	2	0	2	0	0	2	2	2	2	0
0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	0	0	2	0	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	-2	-2	-2	0
0	0	2	0	2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	-2	-2	2	0	2	0	-2	2	2	2	2	-2	
-2	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	
0	0	2	0	2	2	0	2	0	2	2	-2	2	-2	2	2	0	2	0	2	2	2	2	2	
2	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	
0	0	-2	0	-2	2	0	-2	0	2	2	2	2	2	2	-2	0	-2	0	2	-2	-2	-2	-2	
2	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	
0	0	-2	0	-2	2	0	-2	0	2	2	2	2	2	2	-2	0	-2	0	2	-2	-2	-2	-2	
2	-2	0	-2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0	0	0	
0	0	2	0	2	-2	0	2	0	-2	-2	-2	-2	-2	2	0	2	0	-2	2	2	2	2	-2	
-2	2	0	2	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	
0	0	2	0	2	0	0	2	0	0	0	-2	0	-2	0	2	0	2	0	0	2	2	2	0	
0	0	-2	0	-2	0	0	-2	0	0	0	2	0	2	0	-2	0	-2	0	0	-2	-2	-2	0	
0	0	2	0	2	2	0	2	0	2	2	-2	2	-2	2	2	0	2	0	2	2	2	2	2	
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	
2	-2	0	-2	0	2	-2	0	-2	2	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2	2	0	0	0	0	

При поданні на вхід вектору $S_1 = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$, асоційованого вектору S_3^1 отримаємо:

$$S_1 W_{iq_3}^{31} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1) \cdot W_{iq_3}^{31} = (30, -30, 20, -30, 20, 16, -30, 20, -30, 16, 16, -20, 16, -20, 16, 20, -30, 20, -30, 30, 20, 20, 20, 20, 16)$$

Використовуючи функцію активації (2) при нульовому порозі, визначаємо вектор $S_2^1 = (1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$.

Таким чином, розроблений пристрій N-направленої асоціативної пам'яті здатен відновлювати по вхідному вектору N асоціативних йому зображень.

Висновок

Вперше на основі двонаправленої асоціативної пам'яті запропонована архітектура та алгоритми функціонування N-направленої дискретної нейромережевої асоціативної пам'яті, яка здатна відновлювати по вхідному вектору, що подається на будь-який з її вхідних шарів нейронів, безліч з N зображень, які асоціативні до вхідної інформації. На архітектуру і алгоритми функціонування нейромережевої асоціативної пам'яті отримано патент України на винахід.

Література

1. Архангельський В.І. Нейронні мережі в системах автоматизації / В.І. Архангельський, І.М. Богасенко, Г.Г. Грабовський, М.О. Рюмшин. – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
2. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.
3. Дмитриенко В.Д. Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с.
4. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
5. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
6. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае: в 2 т. / А.И. Галушкин. Т. 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367 с.
7. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
8. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский – М.: Финансы и

статистика, 2004. – 344 с.

9. Дмитриенко В.Д. Нейросетевое устройство направленных ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, И.П. Хавина // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия История, политология, экономика, информатика. – № 7 (78). – Вып. 14/1. – Белгород, 2010. – С. 110-119.

10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

11. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

12. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.

13. Рутковский Лешек. Методы и технологии искусственного интеллекта / Лешек Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.

14. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр НТМТ, 2013. – 248 с.

15. Дмитриенко В.Д. Пристрій багатосарової двонаправленої асоціативної пам'яті з керуючими нейронами / В.Д. Дмитриенко, О.Ю. Заковоротний, В.О. Бречко // Патент на винахід 108949 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПИ". – № а 2014 02642; Заявлено 17.03.2014; Опубліковано 25.06.2015; Бюл. № 12.

References

1. Arhangel'skij V.I. Nejrinni merezhi v sistemah avtomatizacii / V.I. Arhangel'skij, I.M. Bogaenko, G.G. Grabovskij, M.O. Rjumshin. – K.: Tehnika, 1999. – 364 s.

2. Kallan R. Osnovnye koncepcii nejronnyh setej / R. Kallan. – M.: Vil'jams, 2001. – 288 s.

3. Dmitrienko V.D. Osnovy teorii nejronnyh setej / V.D. Dmitrienko, N.I. Korsunov. – Belgorod: BIIMMAP, 2001. – 159 s.

4. Komashinskij V.I. Nejrionnye seti i ih primenenie v sistemah upravlenija i svjazi / V.I. Komashinskij, D.A. Smirnov – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2002. – 94 s.

5. Bodjanskij E.V. Iskusstvennye nejronnye seti: arhitektury, obuchenie, primenenie / E.V. Bodjanskij, O.G. Rudenko. – Har'kov: TELETEH, 2004. – 372 s.

6. Galushkin A.I. Nejrokomputery i ih primenenie na rubezhe tysjacheletij v Kitae: v 2 t. / A.I. Galushkin. T. 1. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2004. – 367 s.

7. Barskij A.B. Nejrionnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinjatие reshenij / A.B. Barskij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 176 s.

8. Osovskij S. Nejrionnye seti dlja obrabotki informacii / S. Osovskij – M.: Finansy i statistika, 2004. – 344 s.

9. Dmitrienko V.D. Nejrosetevoe ustrojstvo napravlennyh asociacij / V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj, I.P. Havina // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Istorija, politologija, jekonomika, informatika. – № 7 (78). – Vip. 14/1. – Belgorod, 2010. – S. 110-119.

10. Hajkin S. Nejrionnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin. – M.: Vil'jams, 2006. – 1104 s.

11. Jah"jaeva G.Je. Nechetkie mnozhestva i nejronnye seti: Uchebnoe posobie / G.Je. Jah"jaeva. – M.: Internet-Universitet Informacionnyh Tehnologij; BINOM. Laboratorija znanij, 2006. – 316 s.

12. Galushkin A.I. Nejrionnye seti: osnovy teorii / A.I. Galushkin. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2010. – 496 s.

13. Rutkovskij Leshek. Metody i tehnologii iskusstvennogo intellekta / Leshek Rutkovskij. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2010. – 520 s.

14. Dmitrienko V.D. Modelirovanie i optimizacija processov upravlenija dvizheniem dizel'-poezdov / V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj. – Har'kov: Izd. centr NTMT, 2013. – 248 s.

15. Dmitrienko V.D. Pristrij bagatosharovoї dvonapravenoї asociativnoї pam'jati z kerujuchimi nejronami / V.D. Dmitrienko, O.Ju. Zakovorotnyj, V.O. Brechko // Patent na vinahid 108949 Ukraїna, MPK G06G 7/60. Zajavnik ta volodar patentu NTU "HPI". – № а 2014 02642; Zajavleno 17.03.2014; Opublikovano 25.06.2015; Bjul. № 12.

Рецензія/Peer review : 15.1.2016 р.

Надрукована/Printed : 25.3.2016 р.