

## НЕЙРОПОДІБНА МЕРЕЖНА МОДЕЛЬ ПАРАЛЕЛЬНО-ІЄРАРХІЧНОЇ ОБРОБКИ ЦИФРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЛЯМОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЛАЗЕРНИХ ПУЧКІВ

*В контексті дослідження проблеми ідентифікації плямових зображень лазерних пучків запропоновано нейроподібну мережну модель паралельно-ієрархічної обробки цифрової інформації. На основі проведених досліджень та отриманих результатів запропоновано програмно-апаратну реалізацію системи ідентифікації плямових зображень лазерних пучків на базі паралельно-ієрархічних структур.*

### Вступ

Актуальність даних досліджень та отриманих результатів найхарактерніша для систем, у яких необхідно здійснювати автоматичне коректування спотворень лазерного джерела світлового випромінювання. Це лазерні системи зв'язку і передачі інформації, локації і трасування, для яких необхідні кількісні дані про вплив атмосфери на параметри лазерного променя, що несе певну корисну інформацію. Це також системи світлової навігації з використанням лазерів при розповсюдженні лазерного випромінювання в умовах зі зниженою видимістю в атмосфері, системи точного орієнтування, що дають можливість визначати просторове положення об'єкта, що рухається, у різних метеорологічних умовах.

Основною метою досліджень є розробка та впровадження оптико-електронних нейроподібних паралельно-ієрархічних систем з автоматичним коректуванням похибок формованого світлового випромінювання. Значення вимірювання профілю променя полягає в тому, що густина енергії, концентрація і колімація світла є його взаємопов'язаними складовими характеристиками. Розповсюдження лазерного променя у просторі значно змінює його профіль. Тому важливого значення набуває проблема вимірювання профілю лазерного променя для різноманітних практично-прикладних застосувань, а також координатних характеристик зображень лазерної траси з подальшою можливістю прогнозування координат лазерних зображень у довільні моменти часу [1, 2].

З метою вирішення вказаних проблем в роботі розглядається новий підхід до створення обчислювального середовища — нейроподібної паралельно-ієрархічної системи. Підхід має ряд переваг, у порівнянні з іншими методами формування нейроподібного середовища (наприклад, відомими методами формування штучних нейронних мереж). Головною перевагою підходу є використання наслідків динаміки багаторівневої паралельної взаємодії інформаційних сигналів на різних рівнях ієрархії нейроподібної мережі, що дозволяє поєднати такі відомі природні особливості організації обчислень у корі головного мозку: топографічний характер відображення, одночасність (паралельність) дії сигналів, мозаїчність структури кори, грубу ієрархічність кори, просторово корельований у часі механізм сприйняття та навчання. Формування багатоетапної паралельно-ієрархічної (П) мережі припускає процес послідовного перетворення корельованих і утворення декорельованих у часі елементів нейронної мережі при переході її з одного стійкого стану в інший. Таким чином, мережне перетворення є одним із шляхів реалізації паралелізму і дозволяє формалізувати процедури паралельної взаємодії багаторівневої організації обчислень у часі на різних рівнях ієрархії. Принцип побудови пірамідальної ієрархічної структури даних, можна визначити як послідовність масивів даних того самого інформаційного поля на різноманітних рівнях дозволу:  $P = (A_0, A_1, A_2, \dots, A_L)$ , де  $A_i$  — інформаційне поле,  $i$  — номер рівня дозволу,  $i = \overline{0, L}$ . Така піраміда інформаційних полів формує обчислювальну структуру, яка дозволяє у реальному часі реалізувати методи інтелектуального сенсорного сприйняття. Сутність пірамідального підходу полягає в одночасному використанні під час аналізу послідовності масивів даних на різноманітних рівнях ієрархії. Це дозволяє реалізувати стратегію від «загального до часткового», концепцію нейроподібної обробки. Кожний елемент піраміди інформаційного поля характеризується трьома координатами  $(i, j, k)$ , де

$i$  — рядок,  $j$  — стовпчик,  $k$  — рівень [3].

Таким чином, принцип побудови паралельно-ієрархічної структури даних можна визначити як послідовність операцій над множинами масивів даних, що утворюють множини інформаційних полів різноманітних рівнів ієрархії, взаємодія між якими здійснюється пірамідальною ієрархічною структурою і реалізується на основі мережної архітектури. В паралельно-ієрархічній мережі обробляється множина вхідних потоків даних на різноманітних ( $k$ ) ієрархічних рівнях. Кожний рівень є сукупністю процесорних елементів, які функціонують у чітко фіксовані моменти часу ( $t_j$ ).

### Нейроподібна мережна модель паралельно-ієрархічної обробки цифрової інформації

Для з'ясування загальних закономірностей організації ПП мережі, застосувавши добре розроблений апарат кінцевих різниць [4], розглянемо її математичну модель в динамічному поданні на структурно-функціональному рівні [5, 6].

Нехай фізичне середовище описується цифровою інформацією, яка задана у вигляді множин:  $M_{1,1}^0, \dots, M_{1,k}^0, \dots, M_{1,N_1^0}^0$ , де  $M_{1,k}^0 = \{a_{i_1}^{k_1}\}$ ,  $i_1 = \overline{1; n_{k_1}^0}$ ;  $k_1 = \overline{1; N_1^0}$ ;  $a_{i_1}^{k_1} \in \mathbb{R}$ ,  $a_{i_1}^{k_1} \neq 0$ .

Ця інформація перетворюється і формується наступна модель ПП мережі [3, 6]. З кожної множини  $M_{1,k}^0$  в момент часу  $t_1$  вибирається за  $F^*$  критерієм довільний елемент, позначимо його

$\bigcup_{i_1=1}^{n_{k_1}^0} (a_{i_1}^{k_1})^{t_1}$ , кратність цього елемента позначимо  $(r_{k_1})^{t_1}$ . Причому, із множини  $M_{1,k}^0$  вибір елемента

за  $F^*$  критерієм відбувається лише в тому випадку, якщо в часі складові елементи даної множини корелюють між собою.

Надалі, описуючи ПП мережу, передбачається, що вибираючи на кожному етапі довільний елемент з відповідної множини, складові його елементи також корелюють у часі [3].

У момент часу  $t_2$  з кожного елемента  $a_{i_1}^{k_1}$  множини  $M_{1,k_1}^0$  віднімається обраний елемент

$a_{i_1}^{k_1} - \bigcup_{i_1=1}^{n_{k_1}^0} (a_{i_1}^{k_1})^{t_1} = \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1}$ . У результаті  $Q^*$ -перетворення в момент часу  $t_2$  утворюються нові мно-

жини  $M_{1,k_1}^2$ ,  $k_1 = \overline{1; N_1^2}$ , з елементами  $\Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1}$ . Кількість елементів множини  $M_{1,k_1}^2$  дорівнює

$n_{k_1}^2 = n_{k_1}^0 - (r_{k_1})^{t_1}$ . У момент часу  $t_3$  в кожній з отриманих множин вибирається за  $F^*$  критерієм

довільний елемент, позначимо його  $\bigcup_{i_1=1}^{n_{k_1}^2} \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_3}$ , кратність якого дорівнює  $(r_{k_1})^{t_3}$ . У момент часу

$t_4$  утворюються нові множини  $M_{1,k_1}^4$ ,  $k_1 = \overline{1; N_1^4}$ , елементами яких є різниці

$$\Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1} - \bigcup_{i_1=1}^{n_{k_1}^2} \left( \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1} \right)^{t_3} = \Delta \left( \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1} \right)^{t_3} = \Delta^2(a_{i_1}^{k_1})^{t_1 t_3}.$$

Кількість елементів множини  $M_{1,k_1}^4$  дорівнює  $n_{k_1}^4 = n_{k_1}^2 - (r_{k_1})^{t_3} = n_{k_1}^0 - \left[ (r_{k_1})^{t_1} + (r_{k_1})^{t_3} \right]$  і так

далі. У результаті  $Q^*$ -перетворення в момент часу  $t_{2m}$  утворюються нові множини

$M_{1,k_1}^{2m}$ ,  $k_1 = \overline{1; N_1^{2m}}$ , елементами яких є різниці

$$\Delta \left( \Delta \dots \left( \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1} \right)^{t_3} \dots \right)^{t_{2m-3}} - \bigcup_{i_1=1}^{n_{k_1}^{2m}} \left( \Delta \dots \left( \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1} \right)^{t_3} \dots \right)^{t_{2m-1}} = \Delta \left( \Delta \left( \Delta \dots \left( \Delta(a_{i_1}^{k_1})^{t_1} \right)^{t_3} \dots \right)^{t_{2m-3}} \right)^{t_{2m-1}} =$$

$$= \Delta^m(a_{i_1}^{k_1})^{t_1 t_3 \dots t_{2m-1}}. \quad \text{Кількість елементів множини } M_{1,k_1}^{2m} \text{ дорівнює } n_{k_1}^{2m} = n_{k_1}^0 - \left[ (r_{k_1})^{t_1} + (r_{k_1})^{t_3} + \dots + (r_{k_1})^{t_{2m-1}} \right].$$

Описаний процес є першим етапом формування ПІ мережі, названий її першим рівнем [3, 6]. На другому рівні в момент часу  $t_1$  утвориться множина  $M_{2,1}^1 = \left\{ \bigcup_{i_1=1}^{n_{k_1}^1} (a_{i_1}^{k_1})^{t_1} \right\} = \{a_{i_2}^1\}$ ,  $i_2 = \overline{1; N_1^0}$ .

У момент часу  $t_2$  з цієї множини вибирається довільний елемент, що позначається  $\bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=1}^1} (a_{i_2}^1)^{t_2}$ .

Нехай кратність цього елемента дорівнює  $(r_{k_2=1})^{t_2}$ . Добуток обраного елемента на його кратність

$(r_{k_2=1})^{t_2} \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=1}^1} (a_{i_2}^1)^{t_2}$  запам'ятовується. У момент часу  $t_3$  утвориться нова множина  $M_{2,1}^3$ , елементами якої є різниці  $a_{i_2}^1 - \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=1}^1} (a_{i_2}^1)^{t_2} = \Delta(a_{i_2}^1)^{t_2}$ . Кількість елементів цієї множини

$n_{k_2=1}^3 = N_1^0 - \left[ (r_{k_2=1})^{t_2} \right]$ . І так далі. У момент часу  $t_{2m+1}$  утвориться нова множина  $M_{2,1}^{2m+1}$ , елементами якої є різниці, які є результатом  $Q^*$ -перетворення

$\Delta^{m-1} (a_{i_2}^1)^{t_2 \dots t_{2m-3}} - \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=1}^m} \left( \Delta^{m-1} (a_{i_2}^1)^{t_2 \dots t_{2m-3}} \right)^{t_{2m}} = \Delta^m (a_{i_2}^1)^{t_2 \dots t_{2m}}$ . Кількість елементів цієї множини

дорівнює  $n_{k_2=1}^{2m+1} = N_1^0 - \left[ (r_{k_2=1})^{t_2} + \dots + (r_{k_2=1})^{t_{2m}} \right]$ .

Другий рівень складається з деякої кінцевої кількості підрівнів.

На  $j$ -му підрівні другого рівня ПІ мережі в момент часу  $t_{2m+1}$  утвориться множина  $M_{2,j}^{2m+1}$ , елементами якої є різниці:

$\Delta^{m-j} (a_{i_2}^j)^{t_{2j} t_{2j+2} \dots t_{2m-2}} - \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=j}^{m-(j-1)}} \left( \Delta^{m-j} (a_{i_2}^j)^{t_{2j} \dots t_{2m-2}} \right)^{t_{2m}} =$

$= \Delta^{m-(j-1)} (a_{i_2}^j)^{t_{2j} \dots t_{2m}}$ . Кількість елементів цієї множини дорівнює:  $n_{k_2=j}^{2m+1} = N_1^{2j-2} -$

$-\left[ (r_{k_2=j})^{t_{2j}} + (r_{k_2=j})^{t_{2j+2}} + \dots + (r_{k_2=j})^{t_{2m}} \right]$ .

Далі переходимо до формування третього етапу ПІ мережі, названого третім рівнем [3, 6]. Множини, які утворюються на третьому рівні, складаються з обраних певним чином (по  $F^*$ -критерію) елементів другого рівня. А саме, у момент часу  $t_4$  утвориться множина

$M_{3,1}^4 = \{a_{i_3}^1; i_3 = 1, 2\}$ , елементами якої є два числа  $\left\{ \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=1}^2} \left( \Delta(a_{i_2}^1)^{t_2} \right)^{t_4}; \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=2}^2} (a_{i_2}^2)^{t_4} \right\}$  і  $M_{2,1}^3$  відповідно. Утворення множини  $M_{2,2}^3$  є початком першого підрівня третього рівня. У момент часу  $t_5$  з множини  $M_{3,1}^4$  вибирається довільний елемент, який позначається  $\bigcup_{i_3=1}^2 (a_{i_3}^1)^{t_5}$ . Кратність цього елемента позначимо  $(r_{k_3=1})^{t_5}$ , кратність може приймати значення 1 або 2. Добуток обраного елемента на його кратність запам'ятовується  $(r_{k_3=1})^{t_5} \cdot \bigcup_{i_3=1}^2 (a_{i_3}^1)^{t_5}$ . У момент часу  $t_6$  утвориться множина  $M_{3,1}^6$ , яка складається з одного елемента  $a_{i_3}^1 - \bigcup_{i_3=1}^2 (a_{i_3}^1)^{t_5} = \Delta(a_{i_3}^1)^{t_5}$ , якщо  $(r_{k_3=1})^{t_5} = 1$  або ж  $M_{3,1}^6 = \Phi$ , якщо  $(r_{k_3=1})^{t_5} = 2$ . У першому випадку в момент часу  $t_7$  вибирається елемент

$\bigcup_{i_3=1}^1 \left( \Delta \left( a_{i_3}^1 \right)^{t_5} \right)^{t_7} = \Delta \left( a_{i_3}^1 \right)^{t_5}$ , а в момент часу  $t_8$  перший підрівень закінчується, тому що  $M_{3,1}^8 = \left\{ \Delta \left( a_{i_3}^1 \right)^{t_5} - \bigcup_{i_3=1}^1 \left( \Delta \left( a_{i_3}^1 \right)^{t_5} \right)^{t_7} \right\} = \emptyset$ .

І так далі. На  $j$ -му підрівні третього рівня III мережі в момент часу  $t_{2j+2}$  утвориться множина  $M_{3,j}^{2j+2}$ , яка складатиметься з  $(j+1)$  елементів другого рівня  $M_{3,j}^{2j+2} = \left\{ \bigcup_{i_2=1}^{n_{i_2=1}^{j+1}} \left( \Delta^j \left( a_{i_2}^1 \right)^{t_2, \dots, t_{2j}} \right)^{t_{2j+2}} ; \bigcup_{i_2=1}^{n_{i_2=2}^j} \left( \Delta^{j-1} \left( a_{i_2}^2 \right)^{t_4, \dots, t_{2j}} \right)^{t_{2j+2}} ; \dots ; \bigcup_{i_2=1}^{n_{i_2=j+1}^1} \left( a_{i_2}^{j+1} \right)^{t_{2j+2}} \right\} = \left\{ a_{i_3}^j ; i_3 = \overline{1, j+1} \right\}$ .

У момент часу  $t_{2j+4}$  елементи множини  $M_{3,j}^{2j+2}$  перетворюються в елементи множини  $M_{3,j}^{2j+4}$  за правилом  $a_{i_3}^j - \bigcup_{i_3=1}^{n_{i_3=j}^1} \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{2j+1}} = \Delta \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{2j+1}}$ . Кількість елементів множини  $M_{3,j}^{2j+4}$  може бути рівною  $j; (j-1); \dots; 2; 1; 0$ . Далі в момент часу  $t_{2j+6}$  елементи множини  $M_{3,j}^{2j+4}$  перетворюються в елементи множини  $M_{3,j}^{2j+6}$  за правилом  $\Delta \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{2j+1}} - \bigcup_{i_3=1}^{n_{i_3=j}^2} \left( \Delta \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{2j+1}} \right)^{t_{2j+3}} = \Delta^2 \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{2j+1} t_{2j+1}}$ .

Кількість елементів отриманої множини може бути рівною  $(j-1); (j-2); \dots; 2; 1; 0$ . І так далі. У момент часу  $t_{2j+2m+2}$ ,  $m \leq j+1$ , елементи множини  $M_{3,j}^{2j+2m}$  перетворюються в елементи множини  $M_{3,j}^{2j+2m+2}$  за правилом:

$$\Delta^{m-1} \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{j+1} \dots t_{2j+2m-3}} - \bigcup_{i_3=1}^{n_{i_3=j}^m} \left( \Delta^{m-1} \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{j+1} \dots t_{2j+2m-3}} \right)^{t_{2j+2m-1}} = \Delta^m \left( a_{i_3}^j \right)^{t_{j+1} \dots t_{2j+2m-1}}$$

Кількість елементів отриманої множини може бути рівною  $(j-m); (j-m+1); \dots; 2, 1, 0$ . І так далі;  $j$ -й підрівень третього рівня закінчується в момент часу  $t_{4j+4}$ , тому що  $M_{3,j}^{4j+4} \neq \emptyset$ .

Четвертий етап III мережі, названий четвертим рівнем, починається в момент часу  $t_7$  формуванням нової множини  $M_{4,1}^7$ , яка складається з двох елементів третього рівня  $\left\{ \bigcup_{i_3=1}^{n_{i_3=1}^2} \left( \Delta \left( a_{i_3}^1 \right)^{t_5} \right)^{t_7} ; \bigcup_{i_3=1}^{n_{i_3=2}^1} \left( a_{i_3}^2 \right)^{t_7} \right\} = \left\{ a_{i_4}^1 ; i_4 = 1, 2 \right\}$ .

У момент часу  $t_8$  з цієї множини вибирається довільний елемент. Добуток обраного елемента на його кратність запам'ятовується,  $\left( r_{k_4=1} \right)^{t_8} \bigcup_{i_4=1}^2 \left( a_{i_4}^1 \right)^{t_8}$ . У момент часу  $t_9$  елементи множини  $M_{4,1}^7$  перетворюються в елементи множини  $M_{4,1}^9$  за формулою:  $a_{i_4}^1 - \bigcup_{i_4=1}^2 \left( a_{i_4}^1 \right)^{t_8} = \Delta \left( a_{i_4}^1 \right)^{t_8}$ . Кількість елементів останньої множини може бути рівною 1 або 0. Перший підрівень четвертого рівня закінчується в момент часу  $t_{11}$ , тому що  $M_{4,1}^{11} \neq \emptyset$ .

У результаті перший підрівень закінчується в момент часу  $t_{14}$ , тому що  $M_{5,1}^{14} \neq \emptyset$ , другий підрівень закінчується в момент часу  $t_{16}$ , тому що  $M_{5,2}^{16} \neq \emptyset$ ; третій підрівень закінчується в момент часу  $t_{18}$ , тому що  $M_{5,3}^{18} \neq \emptyset$ . І так далі. За описаною III мережею її підрівні  $(3j-2)$ -й,  $(3j-1)$ -й і  $3j$ -й починаються в моменти часу  $t_{6j+4}$ ;  $t_{6j+6}$  і  $t_{6j+8}$  відповідно формуванням множин

$M_{5,3,j-2}^{6,j+4}$ ,  $M_{5,3,j-1}^{6,j+6}$  і  $M_{5,3,j}^{6,j+8}$ . Кожна з цих множин містить  $(j+1)$  елемент попереднього рівня. У результаті  $(3j-2)$ -й підрівень закінчується в момент часу  $t_{8,j+6}$ ,  $M_{5,3,j-1}^{8,j+6} \neq \emptyset$ .  $(3j-1)$ -й підрівень закінчується в момент часу  $M_{5,3,j-1}^{8,j+8} \neq \emptyset$  і  $(3j)$ -й підрівень закінчується в момент часу  $t_{8,j+10}$ ,  $M_{5,3,j}^{8,j+10} \neq \emptyset$ .

Таким чином, описаний процес дозволяє перетворити вихідну цифрову інформацію, задану у вигляді  $N_1^0$  множин і в чітко фіксовані моменти часу представити як ПІ мережу, починаючи з другого рівня, запам'ятовуються ті добутки, що декорельовані в часі з іншими проміжними результатами [3, 6]. Останні, як видно з вищерозглянутого процесу визначаються кореляцією елементів, що взаємодіють. Вкажемо, елементи ПІ мережі, що декорельовані в часі:

$$\left(r_{k_2=1}^{t_2}\right) \bigcup_{i_2=1}^{n_{k_2=1}^1} \left(a_{i_2}^1\right)^{t_2}$$

— на другому рівні,  $\left(r_{k_3=1}^{t_5}\right) \bigcup_{i_3=1}^{n_{k_3=1}^1} \left(a_{i_3}^1\right)^{t_5}$  — на третьому рівні, і так далі  $\left(r_{k_{j+1}=1}^{t_{3,j-1}}\right) \bigcup_{i_{j+1}=1}^{n_{k_{j+1}=1}^1} \left(a_{i_{j+1}}^1\right)^{t_{3,j-1}}$

на  $(j+1)$ -му рівні.

У результаті в загальному вигляді математична модель в динамічному поданні на структурно-функціональному рівні кореляційних взаємодій елементів ПІ мережі набуває вигляду [3, 6]

$$\sum_{j=1}^n \left(r_{k_{j+1}=1}^{t_{3,j-1}}\right) \bigcup_{i_{j+1}=1}^{n_{k_{j+1}=1}^1} \left(a_{i_{j+1}}^1\right)^{t_{3,j-1}} = \sum_{k_1=1}^{N_1^0} \sum_{i_1=1}^{n_{k_1}^0} a_{i_1}^{k_1},$$

де  $k$  — кількість рівнів ПІ мережі.

### Ідентифікація плямових зображень лазерних пучків на базі нейроподібних паралельно-ієрархічних систем

В подальших дослідженнях пропонується застосувати паралельно-ієрархічну мережу для розв'язання задачі попередньої обробки та ідентифікації плямових зображень лазерних пучків у реальному часі з підвищеною точністю вимірювання координат. Опис методу визначення точки прив'язки, навчальний алгоритм та експериментальні результати викладені в попередніх дослідженнях [7, 8]. Розроблені методики виявляють взаємозв'язок між коефіцієнтами апроксимації сигналу і геометричними характеристиками сигналу (наприклад, енергетичним центром, моментом інерції). Досліджено численні приклади, що переконливо демонструють доцільність застосування запропонованих методик для задачі точного визначення координат при компенсації зміщення зображень у лазерній трасі, з використанням навчального алгоритму для визначення координат точки прив'язки плямового зображення лазерного пучка [9]. Під координатами точки прив'язки  $(x, y)$  розуміємо координати енергетичного центру зображення  $X(g(t))$ , що залежать від сигналу  $X(t)$  й інваріантні до функції деформації  $g(t)$ . Координати  $(x, y)$  енергетичного центру двовимірного сигналу з питомою нелінійною щільністю  $\omega(f(x, y))$ , що відповідає даному значенню  $f(x, y)$ , виражаються як:

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x, y)) x_0; y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x, y)) y_0; M = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \omega(f(x, y)),$$

де  $M$  — моментна ознака.

Запропонований метод, як показує порівняльний аналіз, дозволяє вимірювати координати енергетичних центрів плямових зображень лазерних пучків на основі апроксимації крайових ліній з підвищеною точністю вимірювання, максимальна помилка визначення точки прив'язки 1,5 е. р. (елемент розкладання, піксель), що за точністю перевищує відомі методи, наприклад, на основі визначення центру ваги за допомогою моментних ознак, у середньому в 1,5 рази [7—9].

Вимірювання координат енергетичних центрів плямових зображень лазерних пучків здійсню-

валось за такими етапами: виділення граничних ліній на зображенні (починаючи від точки максимальної яскравості формуються  $N$  її значень —  $(T_{\max} - w)$ , де  $w = 1, \dots, N$ ; крайні точки з яскравістю  $(T_{\max} - w)$  утворюють граничну лінію); визначення попередніх центрів на основі виконання операції урівноваження зображення контурних препаратів за чотирма напрямками; сегментування граничних ліній (обрані точки використовуються як дані для апроксимації); апроксимація граничних ліній (для кожного сегмента методом найменших квадратів проводиться апроксимація); пошук еталонного зображення; тунелювання по усереднених коефіцієнтах апроксимації; навчання ПІ мережі (формується еталонна структура ПІ мережі для еталонного зображення, тобто формується еталонна ПІ мережа для тих зображень, що формують границі тунелю ліворуч і праворуч від центрального тунелю); обробка поточних зображень (знаходяться усереднені значення відношення коефіцієнтів апроксимації для кожного сегмента; у випадку влучення їх значення в один із тунелів і збігу еталонного і поточного зображень ПІ мережі, останнє обирається для подальшої обробки, у протилежному випадку — вилучається; якщо поточне зображення обирається для подальшої обробки, то для нього обчислюється зсув  $\delta_x, \delta_y$ ); оптимізація ваг

$$x = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x, y))(x_0 + \delta_x), \quad y = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} w(f(x, y))(y_0 + \delta_y).$$

У проведених експериментах були застосовані 5 лазерних трас з кількістю — 2040 зображень в кожній трасі. Розроблений навчальний алгоритм для визначення координат точки прив'язки для зображень дозволяє здійснювати обробку плямових зображень лазерних пучків у реальному часі ( $\approx 10,65$  мс) з порівняно простим програмним забезпеченням [10].

В дослідженнях здійснено програмну реалізацію розроблених методів та алгоритмів обробки плямових зображень лазерних пучків [11, 12], що дозволяє користувачеві, завантажити лазерну трасу або ж, окремо, початкове зображення та розрахувати його крайові лінії та їх центри, з їх одночасним відображенням на екрані за шістьма рівнями інтенсивності з можливістю масштабування, а також визначити координати енергетичного центру як окремого зображення, так і цілої лазерної траси з одночасною ідентифікацією зображень за заданим користувачем пороговим рівнем тунелів.

Комп'ютерне моделювання запропонованих ПІ мереж в процесі оброблення зображень довело їх коректність та доцільність використання для розв'язання задач ідентифікації плямових зображень лазерних пучків [12].

## Висновки

В роботі запропоновано нейроподібну мережну модель паралельних обчислювальних процесів обробки інформації у вигляді багатетапних процедур кореляційних взаємодій, що дозволяє розробляти паралельно-ієрархічні інтелектуальні системи. Запропоновано алгоритми структурно-функціональної організації паралельно-ієрархічних мереж, які реалізують різноманітні рівні розпаралелювання процесу обробки інформації, що дозволяє в подальшому здійснювати перетворення та обробку зображень у реальному часі. На базі цього застосовано паралельно-ієрархічну мережу для вирішення задачі попередньої обробки та ідентифікації плямових зображень лазерних пучків у реальному часі. Проведено експериментальні дослідження та здійснено програмну реалізацію розроблених методів та алгоритмів попередньої обробки та ідентифікації зображень у реальному часі з підвищеною точністю (до 1,5 пікселя) вимірювання координат плямових зображень лазерних пучків.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. L. Timchenko, Yu. Kutaev, V. Kozhemyako, A. Gertsy, A. Yarovy, N. Kokryatskaya Method for Processing of Extended Laser Paths Images // *Advances in Electrical and Computer Engineering* — «Stefan cel Mare» University of Suceava, Romania — 2003. — Vol. 3 (10). No 2 (20). — P. 66—78.
2. C. V. Roundy Current Technology of Laser Beam Profile Measurements. — USA, Spiricon, Inc., 2000.
3. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту. Монографія / В. П. Кожем'яко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Свєчніков, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 324 с.
4. Словарь по кибернетике / Под ред. В. С. Михалевича. — 2-е изд. — К.: Гл. Ред. УСЭ. 1989. — 751 с.
5. V. P. Kozhemyako, L. I. Tymchenko, Yu. F. Kutaev, A. A. Yarovy Approach for real-time image recognition. // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. — 2001. — № 1. — С. 110—124.
6. В. П. Кожем'яко, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий Паралельно-ієрархічні мережі як структурно-функціональний базис

для побудови спеціалізованих моделей образного комп'ютера. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 161 с.

7. L. Timchenko, Yu. Kutaev, V. Kozhemyako, A. Yarovy, A. Gertsy, A. Terenchuk, N. Shweiki Method for Training of a Parallel-Hierarchical Network, Based on Population Coding for Processing of Extended Laser Paths Images // Proceedings of SPIE. — 2002. — Vol. 4790. — P. 465—479.

8. V. Kozhemyako, L. Timchenko, Yu. Kutaev, A. Gertsy, A. Yarovy, N. Kokryatskaya, N. Grebenyuk, O. Poplavsky Analysis of the methodological approaches in connection with the problem solving of extrapolation of object trajectory // Proceedings of SPIE. — 2003. — Vol. 5175. — P. 222—236.

9. Кожем'яко В. П., Тимченко Л. І., Яровий А. А. Методологічні підходи до паралельно-ієрархічної обробки плямових зображень лазерних пучків та їх прикладна реалізація // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2006. — № 1 (11). — С. 14—25.

10. Kozhemyako V., Timchenko L., Kutaev Yu., Yarovy A., Gertsy A., Kokryatskaya N. Extrapolation of object trajectory: methodological approaches of problem solving on the base of parallel-hierarchical transformation // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2004. — № 1 (7). — С. 49—61.

11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 21866. Комп'ютерна програма для аналізу та ідентифікації плямових зображень лазерних пучків у реальному часі з підвищеною точністю вимірювання координат енергетичних центрів як складових характеристик профілю лазерного променя («Laser Beam Analysis») / Яровий А. А., Зарезенко Д. П., Коновалюк Ю. М. Державний Департамент інтелектуальної власності України. 30.08.2007.

12. V. Kozhemyako, L. Timchenko, A. Yarovy. Software Support of Accurately Measurement and Prediction of Laser Beam Profile Characteristics // Proceedings of the X International Conference «Światłowody i ich zastosowania», Tom 2 — Lublin, Liber Duo s. c., 2006 — P. 675—684.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2007)» (31.05—2.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.09.07  
Рекомендована до друку 04.10.07

**Яровий Андрій Анатолійович** — доцент кафедри інтелектуальних систем.

Вінницький національний технічний університет