

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНИКА

INFORMATIONAL TECHNOLOGIES AND COMPUTING ENGINEERING

УДК 681.324:621.383.8

В. П. Кожем'яко, д. т. н., проф.; А. А. Яровий, к. т. н.

В. П. Кожем'яко, д. т. н., проф.; А. А. Яровой, к. т. н.

V. Kozhemyako, Sc. Dr. (Eng.), Prof.; A. Yarovy, Sc. Cand. (Eng.)

ПІРАМІДАЛЬНЕ ПРОСТОРОВО-ЗВ'ЯЗАНЕ ПРЕПАРУВАННЯ ТА ЙОГО ПРИКЛАДНА РЕАЛІЗАЦІЯ

ПИРАМИДАЛЬНОЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-СВЯЗАННОЕ ПРЕПАРИРОВАНИЕ И ЕГО ПРИКЛАДНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

PYRAMIDAL SPATIALLY CONNECTED PREPARATION AND ITS APPLIED REALIZATION

В контексті дослідження проблеми розпізнавання образів, запропоновано спосіб пірамідального узагальненого просторово-зв'язаного препарування та його апаратна реалізація для обробки сигналів. На основі проведених досліджень та отриманих результатів моделювання наводиться порівняльний аналіз запропонованого способу з відомими.

В контексте исследования проблемы распознавания образов, предложен способ пирамидального обобщенного пространственно-связного препарирования и его аппаратная реализация для обработки сигналов. На основании проведенных исследований и полученных результатов моделирования приводится сравнительный анализ предложенного способа с известными.

In the context of images recognition problem research, the pyramidal method of generalized specially connected preparation and its hardware realization for signal processing is proposed. On the basis of scientific research carried out and results of modeling, the comparative analysis of the offered method with already known studies is suggested.

Вступ

Інтелектуальні інформаційні технології — це високі технології, які моделюють та відтворюють елементи інтелекту людини. Одним із проявів якісно нового підходу в системі методології сучасних інтелектуальних структур є наукові дослідження в напрямку створення образного комп'ютера. Розробку таких комп'ютерів, які виконують не тільки обчислення, але й моделюють образне сприйняття світу, образне прийняття рішень і орієнтовані на виконання функціонального моделювання інтелектуальної діяльності людини, відносять до проривних напрямків у науково-технічному поступі [1].

Правильний вибір конкретних засобів реалізації оптико-електронних архітектур образного комп'ютера має особливо важливе значення для досягнення потрібних техніко-економічних показників. Як правило, перед розробниками оптико-електронних архітектур образного комп'ютера постають проблеми, пов'язані з неоднозначністю вибору можливих варіантів побудови багатьох функціональних блоків, які можуть бути реалізовані апаратними, програмними або апаратно-програмними засобами [2].

Метою даного дослідження є розвиток теоретичних основ для вирішення актуальної науково-технічної проблеми — створення нейроподібної схеми обробки інформації на основі паралельно-ієрархічного перетворення і реалізації нових методів, способів та програмно-апаратних засобів для ефективного багатоетапного сприйняття, збереження, ущільнення і розпізнавання образів в інформаційних структурах та обчислювальних пристроях.

Відповідно до мети вирішено на основі розробленої в межах наукової школи концепції опису інформаційних полів у вигляді спектра просторової зв'язності складових його елементів розробити спосіб узагальненого просторово-зв'язаного препарування і багаторівневої сегментації на основі аналізу спектра зв'язності напівтонових зображень, що дозволило б адаптувати поріг до аналізованого зображення й адекватно обчисленому порогу, реалізувати багатоступінний процес поділу на окремі його сегменти.

Введение

Интеллектуальные информационные технологии — это высокие информационные технологии, которые моделируют и воссоздают элементы интеллекта человека. Одним из проявлений качественно нового подхода в системе методологии современных интеллектуальных структур являются научные исследования, которые осуществляются в направлении создания образного компьютера. Разработку таких компьютеров, которые выполняют не только вычисления, но и моделируют образное восприятие мира, образное принятие решений и ориентированные на выполнения функционального моделирования интеллектуальной деятельности человека, относят к прорывным направлениям в научно-техническом прогрессе [1].

Правильный выбор конкретных средств реализации оптико-электронных архитектур образного компьютера имеет особенно важное значение для достижения нужных технико-экономических показателей. Как правило, перед разработчиками оптико-электронных архитектур образного компьютера возникают проблемы, связанные с неоднозначностью выбора возможных вариантов построения многих функциональных блоков, которые могут быть реализованы аппаратными, программными или аппаратно-программными средствами [2].

Целью данных исследований есть развитие теоретических основ для решения актуальной научно-технической проблемы — создание нейроподобной схемы обработки информации на основе параллельно-иерархического преобразования и реализации новых методов, способов и программно-аппаратных средств для эффективного многоэтапного восприятия, сохранение, уплотнение и распознавание образов в информационных структурах и вычислительных устройствах.

Соответственно цели на основе разработанной в пределах научной школы концепции описания информационных полей в виде спектра пространственной связности составляющих его элементов решено разработать способ обобщенного пространственно-связанного препарирования и многоуровневой сегментации на основе анализа спектра связности полутоновых изображений, что разрешило бы адаптировать порог к анализируемому изображению и адекватно вычисленному порогу, реализовать многоэтапный процесс деления на отдельные его сегменты.

Introduction

The information technologies are high information technologies, which model and reconstruct elements of intelligence of the man. One of demonstrations of basically new approach in the system of methodology of modern intellectual structures is scientific research, carried out in the direction of pattern computer creation. Development of such computers, which carry out not only calculations, but also simulate image perception of the world, pattern decision-making art and focused on performance of functional modelling of intellectual activity of man are breakthrough directions in scientific progress [1].

The correct choice of realization means of optoelectronic architecture of pattern computer is of paramount importance for achieving necessary technical and economic parameters. Generally, the developers of optoelectronic architecture of the pattern computer face the problems connected with ambiguity of choice of probable variants of many functional blocks construction, which can be realized by hardware, program or hardware-software means [2].

The purpose of the given research is elaboration of theoretical fundamentals for the solution of actual scientific and technical problem — creation of neurolike scheme of information processing on the basis of parallel-hierarchical (PH) transformation and realization of new methods, directions and hardware-software means for effective multi-stage perception, saving, compression and pattern recognition in information structures and computing devices.

According to the purpose of the research — on the basis of the concept of the description of information fields as a spectrum spatial cohesion of composing elements, developed in scientific school, it was decided to develop the methods of generalized spatially connected preparation and multilevel segmentation on the basis of the analysis of spectrum cohesion of the grey-level images, which would permit to adapt the threshold for the analyzed image and adequately calculate threshold to realize multi-stage process of division on its separate segments.

Розробка способу пірамідального просторово-зв'язаного препарування

Проблема розпізнавання образів і аналізу зображень у реальному часі пов'язана із необхідністю забезпечення інваріантності (тобто нечутливості) або зниженої чутливості до повороту образу або аналізованого зображення. Ефективним способом досягнення необхідної при цьому високої продуктивності є інформаційне стиснення зображення з одночасним виділенням інваріантних до повороту ознак [3, 4]. Суть способу узагальненого просторово-зв'язаного препарування є такою.

Формують m затриманих сигналів шляхом затримки відеосигналу на час τ_i для i -го затриманого сигналу, де $i = \overline{1, m}$. Одночасно формують m різницевих сигналів і перший двоградаційний сигнал шляхом дворівневого квантування щодо заздалегідь сформованого порогового сигналу.

Формують також m затриманих двоградаційних сигналів шляхом затримки першого двоградаційного сигналу на час τ_i для i -го затриманого сигналу.

Проводять одночасну дискретизацію з періодом дискретизації T_d сформованих різницевих сигналів і запам'ятовують дискретизовані значення з періодом T_d . Порівнюють кожне запам'ятоване значення з додатним і від'ємним опорними сигналами. Формують за результатами порівняння запам'ятоване значення i -го дискретизованого різницевого сигналу i -го двоградаційного першого сигналу порівняння з тривалістю, рівною періоду T_d й одиничному значенню при рівності або перевищенні запам'ятованого значення над додатним опорним сигналом або нульовим значенням у протилежному випадку. За результатами порівняння формують також різницевий сигнал i -го двоградаційного другого сигналу порівняння з тривалістю, рівною періоду T_d , і одиничним значенням при не перевищенні запам'ятованого значення над від'ємним опорним сигналом або нульовим значенням у протилежному випадку, а також i -го двоградаційного третього сигналу з тривалістю, рівною періоду T_d , і одиничним значенням, коли запам'ятоване значення менше додатного опорного сигналу і більше від'ємного сигналу, або нульовим значенням у протилежному випадку. Потім проводиться подальше формування вихідних сигналів додатного, від'ємного і нульового препаратів. Відмінна риса запропонованого способу — організація пірамідальної обробки, яка є такою.

Перед формуванням різницевих сигналів із вхідного і m -затриманих сигналів виділяють загальний сигнал і m -порівнюваних із ним сигналів, а формування кожного різницевого сигналу здійснюють між виділеними загальним сигналом і одним із порівнюваних сигналів. Причому, формування першого двоградаційного сигналу здійснюють шляхом дворівневого квантування виділеного загального сигналу. Далі формують перший додатковий двоградаційний сигнал одиничного значення за умови збігу одиничних значень першого і m -затриманих двоградаційних сигналів або нульового значення в протилежному випадку. Одночасно з дискретизацією різницевих сигналів дискретизують із періодом T_d додатковий двоградаційний сигнал і запам'ятовують кожне його значення на період T_d , одержуючи при цьому вихідний стробуючий сигнал. Формують перший, другий і третій сумарні сигнали шляхом підсумовування значень m перших сигналів порівняння, m других сигналів порівняння і m третіх сигналів порівняння відповідно. Таким чином, формування сигналів додатного, від'ємного і нульового узагальнених препаратів здійснюють із значенням відповідно першого, другого і третього сумарного сигналу при одиничному значенні стробуючого сигналу, або нульовим значенням при нульовому значенні стробуючого сигналу відповідно. Як загальний сигнал виділяють $\frac{m}{2}$ затриманий сигнал, а як сигнали, що порівнюються із ним, — відеосигнал та інші затримані сигнали.

Відповідна апаратна реалізація способу пірамідального просторово-зв'язаного препарування запропонована та реалізована авторами в [5].

Варіанти реалізації кореляційного-екстремального способу на основі способу узагальненого просторово-зв'язаного препарування

Реальні малозашумлені зображення характеризуються гладкістю і відсутністю різких меж. Внаслідок цього в разі правильно обраної частоти дискретизації має місце кореляція значень сусідніх елементів дискретизованого зображення. З цієї причини не потрібно абсолютного

суміщення периферійних елементів при повороті зображення і виявляється інваріантність до його повороту.

У загальному випадку розташування центрального і периферійного елементів може бути довільним, у тому числі й асиметричним. Проте, із викладеного випливає, що слабша чутливість до повороту зображення має місце тоді, коли периферійні елементи збігаються з вершинами правильного багатокутника і рівновіддалені від центрального елемента, що збігається з центром цього багатокутника і відповідного $\frac{m}{2}$ затриманому сигналу, який потребує реалізації спеціального аналізу. В результаті більшої інваріантності до повороту зображення запропонованим способом в порівнянні з відомими [3, 4] для нього також істотно спрощується проблема вибору набору часу затримки, який відповідає центральному і периферійним елементам дискретизованого зображення, для забезпечення формування вихідних сигналів узагальненого препарату, ефективного для наступного розпізнавання або аналізу зображення.

Використовуючи розглянутий вище спосіб узагальненого просторово-зв'язного препарування для випадку $N = 0$ (є окремим випадком запропонованого способу, для якого в якості загального сигналу пристрій виділяє відеосигнал), також наводяться варіанти реалізації кореляційно-екстремального способу [4, 5] визначення точної локалізації протяжного неоднорідного фонового об'єкта. Вказаний спосіб відрізняється високою завадостійкістю й адаптивністю до непевності і мінливості завадосигнальної обстановки за рахунок попереднього конвеєрного формування згорткових сум корельованих зображень. Використовується також ідея скорочення обсягу обчислень при представленні зображення у вигляді неповного W -спектра і спрощення при попередній обробці корельованих зображень за адаптивним способом узагальненого контурного препарування [4].

Сутність викладеного способу полягає у визначенні фрагмента зображення, який включає найінформативнішу (відповідно до критерію, який варіюється) ділянку фону, і кореляційно-екстремальному вимірюванні міжкадрового зсуву даного фрагмента з наступним препаруванням вимірюваного зсуву до шуканого зсуву фону, при цьому розміри фрагмента є проміжними між розміром динамічного об'єкта і протяжного фону.

Математична модель локалізації протяжного об'єкта з попереднім згортковим підсумовуванням зображення зводиться до виконання таких дій:

а) розбивають поле кадру двовимірного зображення, розміром $n \times n$ відліків на $\left(\frac{n}{m}\right)^2$ фрагментів, розміром $m \times m$ відліків і накопичують згортки за фрагментами (середнього значення сум відліків за фрагментами):

$$\tilde{f}(k, l) = \frac{\sum_{j=l\frac{n}{m}}^{(l+1)\frac{n}{m}-1} \sum_{i=k\frac{n}{m}}^{(k+1)\frac{n}{m}-1} \tilde{f}(i, j)}{m \cdot m}, \quad (1)$$

де $\tilde{f}(i, j)$ — цифровий відлік зображення з координатами i, j (цифровой отсчет изображения с координатами i, j ; digital image counting with coordinates i, j); (k, l) — номер фрагмента зображення (номер фрагмента изображения; number of image fragment) $k = l = 0, \frac{n}{m} - 1$;

б) запам'ятовують накопичені згортки $\tilde{f}(k, l)$ поточного зображення (ПЗ) і використовують їх як згортки $\bar{f}_g(k, l)$ затриманого зображення (ЗЗ) у наступному кадрі;

в) вибирають фрагмент (k_m, l_m) , для якого модуль різниці згорток ПЗ і ЗЗ мінімальний

0...1, forming by the uniform random function).

Зашумлення відліку сигналу проводилося шляхом додавання відліку сигналу з відповідним відліком шуму. В нормальному розподілі щільності ймовірності $P(x)$ має місце вираз

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-a)^2}{4\pi}}, \quad (8)$$

де x — амплітуда випадкового шумового відліку (амплітуда случайного шумового отсчета; amplitude of the random noise countings); a — математичне очікування шумових відліків (математическое ожидание шумовых отсчетов; mathematical expectation of noise countings); σ — середньоквадратичне відхилення шумових відліків (среднеквадратическое отклонение шумовых отсчетов; mean square deviation of the noise countings).

Середньоквадратичне відхилення визначається за правилом «трьох сигм», тобто

$$\sigma = \frac{GN_{\max}}{100 \cdot 3}, \quad (9)$$

де G — ступінь зашумлення масиву відліків сигналу гауссівським шумом (ступень зашумления массива отсчетов сигнала гауссовским шумом; noise level of the array of signal counting by Gaussian noise) (%).

Для шумових відліків, амплітудою $x_i = 0, 1, 2, 3, \dots$, і математичного очікування, рівного нулю, визначені ймовірності

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{x_i}^{x_i+1} e^{-\frac{x^2}{4\pi}} dx \quad (10)$$

і сформований масив шумових відліків, у якому кількість шумових відліків з амплітудою x_i відповідає обчисленій ймовірності $P(x_i)$, тобто

$$P(x_i) \approx \frac{N(x_i)}{N_z}, \quad (11)$$

де $N(x_i)$ — кількість шумових відліків амплітудою x_i (число шумовых отсчетов амплитудой x_i ; number of noise countings by amplitude x_i); N_z — загальна кількість шумових відліків масиву (общее количество шумовых отсчетов массива; total amount of array noise countings).

Відношення сигнал/шум визначалося як відношення істинного/хибного піків масиву відліків рангової взаємкореляційної функції (РВКФ). Значення істинного піка $R(x_u)$ РВКФ визначалося за апіорно заданим істинним зсувом фону x_u . Значення максимального хибного піка визначається таким чином.

З масиву відліків РВКФ виключаються відліки, для яких

$$R(x_u + 1 + i) = \begin{cases} 0, & \text{if } R(x_u - i) - R(x_u - 1 - i) > 0; \\ R(x_u + 1 + i), & \text{else,} \end{cases} \quad i = \overline{0, x_{\max} - x_u},$$

$$R(x_u - 1 - i) = \begin{cases} 0, & \text{if } R(x_u - i) - R(x_u - 1 - i) > 0; \\ R(x_u - 1 - i), & \text{else,} \end{cases} \quad i = \overline{0, x_u - 1}. \quad (12)$$

З відліків, що залишилися, знаходиться відлік із максимальною амплітудою $R(x_j)$. Це максимальний хибний пік.

У табл. 1—4 подано результати порівняння способів контурного препарування [5] і запропонованих способів препарування за критерієм відношення істинного/хибного піків для масивів випадкових і синусоїдальних відліків фону при різноманітних ступенях зашумлення масивів рівномірним і гауссівським шумом і різноманітній довжині рангового вектора.

Порівняльна таблиця способів препарування для відношення істинний/хибний пік при різноманітних ступенях рівномірного зашумлення масивів випадкових відліків і довжині рангового вектора

Сравнительная таблица способов препарирования для отношения истинный / ошибочный пик при разнообразных степенях равномерного зашумления массивов случайных отсчетов и длине рангового вектора

Comparative table of the preparation methods for the relation of true / fault peak at various degrees of uniform noise of arrays of casual countings and length of rank vector

Довжина рангового вектора (Длина рангового вектора The length of rank vector)	Спосіб обробки (Способ обработки Processing method)	Ступінь зашумлення (%) (Степень зашумления (%)) Noise ratio (%)				
		0	5	10	15	20
r = 1	1 спосіб (спосіб; method)	2,07	1,92	1,93	1,91	1,66
	2 спосіб (спосіб; method)	1,75	1,0	1,08	1,85	0,75
	3 спосіб (спосіб; method)	2,8	1,25	1,5	1,0	0,73
r = 2	1 спосіб (спосіб; method)	2,24	2,11	1,96	1,6	1,57
	2 спосіб (спосіб; method)	0,93	0,92	1,0	1,0	0,91
	3 спосіб (спосіб; method)	1,18	0,91	1,0	1,0	1,13
r = 3	1 спосіб (спосіб; method)	2,39	2,09	2,15	1,63	1,58
	2 спосіб (спосіб; method)	1,33	1,0	1,1	1,13	0,73
	3 спосіб (спосіб; method)	1,33	1,11	1,38	1,14	0,7

Таблиця 2

Порівняльна таблиця способів препарування для відношення істинний/хибний пік при різноманітних ступенях рівномірного зашумлення масивів синусоїдальних відліків і довжині рангового вектора

Сравнительная таблица способов препарирования для отношения истинный/ошибочный пик при разнообразных степенях равномерного зашумления массивов синусоидальных отсчетов и длине рангового вектора

Comparative table of the preparation methods for the relation of true / fault peak at various degrees of uniform noise of arrays of sinusoidal countings and length of rank vector

Довжина рангового вектора (Длина рангового вектора The length of rank vector)	Спосіб обробки (Способ обработки Processing method)	Ступінь зашумлення (%) (Степень зашумления (%)) Noise ratio (%)				
		0	5	10	15	20
r = 1	1 спосіб (спосіб; method)	1,35	0,86	1,0	0,82	0,71
	2 спосіб (спосіб; method)	1,0	1,0	1,0	0,92	0,86
	3 спосіб (спосіб; method)	1,0	1,0	1,0	0,89	0,5
r = 2	1 спосіб (спосіб; method)	8,79	1,05	0,85	0,91	0,81
	2 спосіб (спосіб; method)	1,0	0,62	0,91	0,69	0,91
	3 спосіб (спосіб; method)	1,0	0,62	0,82	0,71	1,0
r = 3	1 спосіб (спосіб; method)	15,2	0,86	0,89	0,92	0,76
	2 спосіб (спосіб; method)	5	1,0	1,0	1,0	0,85
	3 спосіб (спосіб; method)	1,0	1,0	0,91	0,78	0,7

Порівняльна таблиця способів препарування для відношення істинний/хибний пік при різноманітних ступенях гауссівського зашумлення масивів випадкових відліків і довжині рангового вектора

Сравнительная таблица способов препарирования для отношения истинный/ошибочный пик при разнообразных степенях гауссовского зашумления массивов случайных отсчетов и длине рангового вектора

Comparative table of the preparation methods for the relation of true / fault peak at various degrees of Gaussian noise of arrays of casual countings and length of rank vector

Довжина рангового вектора (Длина рангового вектора The length of rank vector)	Спосіб обробки (Способ обработки Processing method)	Ступінь зашумлення (%) (Степень зашумлення (%) Noise ratio (%))				
		0	5	10	15	20
r = 1	1 спосіб (способ; method)	2,07	2,07	1,9	1,9	1,9
	2 спосіб (способ; method)	1,75	1,56	1,0	1,0	1,0
	3 спосіб (способ; method)	2,8	1,75	3,5	1,56	1,11
r = 2	1 спосіб (способ; method)	2,24	2,02	1,98	2,02	1,89
	2 спосіб (способ; method)	0,93	0,92	1,0	1,17	0,92
	3 спосіб (способ; method)	1,18	1,09	1,2	1,17	1,0
r = 3	1 спосіб (способ; method)	2,39	2,42	2,09	1,93	1,9
	2 спосіб (способ; method)	1,3	1,2	0,82	1,11	1,0
	3 спосіб (способ; method)	1,3	1,2	0,82	1,11	1,0

Таблиця 4

Порівняльна таблиця способів препарування для відношення істинний/хибний пік при різноманітних ступенях гауссівського зашумлення масивів синусоїдальних відліків і довжині рангового вектора

Сравнительная таблица способов препарирования для отношения истинный/ошибочный пик при разнообразных степенях гауссовского зашумления массивов синусоидальных отсчетов и длине рангового вектора

Comparative table of the preparation methods for the relation of true / fault peak at various degrees of Gaussian noise of arrays of sinusoidal countings and length of rank vector

Довжина рангового вектора (Длина рангового вектора The length of rank vector)	Спосіб обробки (Способ обработки Processing method)	Ступінь зашумлення (%) (Степень зашумлення (%) Noise ratio (%))				
		0	5	10	15	20
r = 1	1 спосіб (способ; method)	1,35	1,23	0,89	0,80	1,03
	2 спосіб (способ; method)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	3 спосіб (способ; method)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
r = 2	1 спосіб (способ; method)	8,79	1,32	0,94	0,94	0,8
	2 спосіб (способ; method)	1,0	1,0	0,82	1,2	0,57
	3 спосіб (способ; method)	1,0	1,0	0,82	1,22	0,57
r = 3	1 спосіб (способ; method)	15,25	8,15	0,97	0,97	0,92
	2 спосіб (способ; method)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	3 спосіб (способ; method)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Примітка: 1 спосіб — спосіб контурного препарування; 2 спосіб — запропонований спосіб препарування; 3 спосіб — запропонований спосіб препарування з корекцією.

Примечание: 1 способ — способ контурного препарирования; 2 способ — предложенный способ препарирования; 3 способ — предложенный способ препарирования с коррекцией.

Note: 1 method — contour preparation method; 2 method — offered preparation method; 3 method — offered preparation method with correction.

Разработка способа пирамидального пространственно-связанного препарирования

Проблема распознавания образов и анализа изображений в реальном времени связана с необходимостью обеспечения инвариантности (т. е. нечувствительности) или сниженной чувствительности к повороту образа или анализируемого изображения. Эффективным способом достижения необходимой при этом высокой производительности есть информационное сжатие изображения с одновременным выделением инвариантных к повороту признаков [3, 4]. Суть способа обобщенного пространственно-связанного препарирования следующая.

Формируют m задержанных сигналов путем задержки видеосигнала на время τ_i для i -го задержанного сигнала, где $i = \overline{1, m}$. Одновременно формируют m разностных сигналов и первого двухградационного сигнала путем двухуровневого квантования относительно заранее сформированного порогового сигнала.

Формируют также m задержанных двухградационных сигналов путем задержки первого двухградационного сигнала на время τ_i для i -го задержанного сигнала.

Проводят одновременную дискретизацию с периодом дискретизации T_d сформированных разностных сигналов и запоминают дискретизированные значения с периодом T_d . Сравнивают каждое запомненное значение с положительным и отрицательным опорными сигналами. Формируют по результатам сравнения запомненного значения i -го дискретизированного разностного сигнала i -го двухградационного первого сигнала сравнения с продолжительностью, равной периоду T_d и единичному значению, при равенстве или превышении запомненного значения над отрицательным опорным сигналом или нулевым значением в противоположном случае. По результатам сравнения формируют также разностный сигнал i -го двухградационного второго сигнала сравнения с продолжительностью, равной периоду T_d , и единичным значением при не превышении запомненного значения над отрицательным опорным сигналом или нулевым значением в противоположном случае, а также i -го двухградационного третьего сигнала с продолжительностью, равной периоду T_d , и единичным значением, когда запомненное значение меньше положительного опорного сигнала и больше отрицательного сигнала, или нулевым значением в противном случае. Потом проводится следующее формирование исходных сигналов положительного, отрицательного и нулевого препаратов. Отличительная особенность предложенного способа — организация пирамидальной обработки, которая заключается в следующем.

Перед формированием разностных сигналов из входного и m -задержанных сигналов выделяют общий сигнал и m -сравниваемых с ним сигналов, а формирование каждого разностного сигнала осуществляют между выделенными общим сигналом и одним из сравниваемых сигналов. Причем, формирование первого двухградационного сигнала осуществляют путем двухуровневого квантования выделенного общего сигнала. Дальше формируют первый дополнительный двухградационный сигнал единичного значения при условии совпадения единичных значений первого и m -задержанных двухградационных сигналов или нулевого значения в противном случае. Одновременно с дискретизацией разностных сигналов дискретизируют с периодом T_d дополнительный двухградационный сигнал и запоминают каждое его значение на период T_d , получая при этом исходный стробирующий сигнал. Формируют первый, второй и третий суммарные сигналы путем суммирования значений m первых сигналов сравнения, m вторых сигналов сравнения и m третьих сигналов сравнения соответственно. Таким образом, формирование сигналов положительного, отрицательного и нулевого обобщенных препаратов осуществляют со значением соответственно первого, второго и третьего суммарного сигнала при единичном значении стробирующего сигнала, или нулевым значением при нулевом значении стробирующего сигнала соответственно. Как общий сигнал выделяют $\frac{m}{2}$ задержанный сигнал, а как сигналы, которые сравниваются с ним, — видеосигнал и другие задержанные сигналы.

Соответствующая аппаратная реализация способа пирамидального пространственно-связанного препарирования предложена и реализована авторами в [5].

Варианты реализации корреляционно-экстремального способа на основе способа обобщенного пространственно-связанного препарирования

Реальные малозашумленные изображения характеризуются гладкостью и отсутствием резких границ. Вследствие этого при верно избранной частоте дискретизации имеет место корреляция значений соседних элементов дискретизированного изображения. По этой причине не нужно абсолютного совмещения периферийных элементов при повороте изображения и наблюдается инвариантность к его повороту.

В общем случае расположение центрального и периферийного элементов может быть произвольным, в том числе и асимметрическим. Тем не менее, из изложенного вытекает, что более слабая чувствительность к повороту изображения имеет место тогда, когда периферийные элементы совпадают с вершинами правильного многоугольника и равноотстоят от центрального элемента, который совпадает с центром этого многоугольника и соответствующего $\frac{m}{2}$ задержан-

ному сигналу, который нуждается в реализации специального анализа. В результате большей инвариантности к повороту изображения предложенным способом в сравнении с известными [3, 4] для него также существенным образом упрощается проблема выбора набора времени задержки, который отвечает центральному и периферийным элементам дискретизированного изображения, для обеспечения формирования исходных сигналов обобщенного препарата, эффективного для последующего распознавания или анализа изображения.

Используя рассмотренный выше способ обобщенного пространственно-связного препарирования, для случая $N = 0$ (отдельный случай предложенного способа, для которого в качестве общего сигнала прибор выделяет видеосигнал) также приводятся варианты реализации корреляционно-экстремального способа [4, 5] определения точной локализации протяжного неоднородного фонового объекта. Указанный способ отличается высокой помехоустойчивостью и адаптивностью к неуверенности и изменчивости помехоустойчивой обстановки за счет предыдущего конвейерного формирования сверточных сумм коррелированных изображений. Используется также идея сокращения объема вычислений при представлении изображения в виде неполного W -спектра и упрощение при предыдущей обработке коррелированных изображений по адаптивному способу обобщенного контурного препарирования [4].

Сущность изложенного способа состоит в определении фрагмента изображения, который включает наиболее информативный (согласно критерию, который варьируется) участок фона, и корреляционно-экстремальном измерении междукадрового сдвига данного фрагмента со следующим препарированием измеренного сдвига к искомому сдвигу фона, при этом размеры фрагмента являются промежуточными между размером динамического объекта и протяжного фона.

Математическая модель локализации протяжного объекта с предыдущим сверточным суммированием изображения сводится к выполнению следующих действий:

а) разбивают поле кадра двухмерного изображения, размером $n \times n$ отсчетов на $\left(\frac{n}{m}\right)^2$ фрагментов, размером $m \times m$ отсчетов и накапливают свертки за фрагментами (среднего значения сумм отсчета за фрагментами): (1);

б) запоминают накопленные свертки $\bar{f}(k, l)$ текущего изображения (ТИ) и используют их как свертки $\bar{f}_g(k, l)$ задержанного изображения (ЗИ) в следующем кадре;

в) выбирают фрагмент (k_m, l_m) , для которого модуль разности сверток ТИ и ЗИ минимальный (2);

г) вычисляют локальный разностный порог δ , необходимый при контурном препарировании отсчетов избранного фрагмента путем конвейерного накопления суммы $\bar{f}^>$ отсчетов больших сверток и суммы $\bar{f}^<$ меньших сверток $\bar{f}(k, l)$ по фрагменту (k_m, l_m) (3);

д) формируют массив контурных препаратов $q_f(i, j)$ путем конвейерного накопления сумм $S_f(i, j)$ по окрестности каждого отсчета $\bar{f}(i, j)$ (4) и сравнивают результат $S_f(i, j)$ с локальным разностным порогом δ (5);

е) запоминают массив контурных препаратов $\{q_f(i, j)\}$ ТИ и выдают его как массив $\{q_d(i, j)\}$ ЗИ в следующем кадре;

ж) проводят корреляционное сравнение массивов $\{q_f(i, j)\}$ и $\{q_d(i, j)\}$, и определение координат максимума взаимно корреляционной функции (ВКФ) $X_{f \max}, Y_{f \max}$;

з) проводят обработку координат максимума ВКФ для ТИ и ЗИ и определяют координаты сдвига фона, которые содержатся в избранном фрагменте, за кадр (6).

Сравнительная характеристика способов препарирования

В исследованиях моделировалось влияние шумовых отсчетов на отсчеты одномерных сигналов объекта и фона. Рассматривались два основных вида шума: с равномерным и нормальным (Гауссовским) распределениями плотности вероятности. Амплитуда шумового отсчета r_i при равномерном распределении определялась как (7).

Зашумление отсчета сигнала проводилось путем добавления отсчета сигнала с соответствующим отсчетом шума. При нормальном распределении плотности вероятности $P(x)$ имеет место соотношение (8).

Среднеквадратическое отклонение определяется по правилу «трех сигм» (9).

Для шумових отсчетов, амплитудой $x_i = 0, 1, 2, 3, \dots$ и математического ожидания, равного нулю, определены вероятности (10) и сформирован массив шумовых отсчетов, в котором количество шумовых отсчетов с амплитудой x_i отвечает вычисленной вероятности $P(x_i)$ (11).

Отношение сигнал/шум определяется как отношение истинного/ошибочного пиков массива отсчетов ранговой взаимнокорреляционной функции (РВКФ). Значение истинного пика $R(x_u)$ РВКФ определяется по априорно заданному истинному сдвигу фона x_u . Значение максимального ошибочного пика определяется таким образом.

Из массива отсчетов РВКФ исключаются отсчеты, для которых (12).

Из оставшихся отсчетов определяется отсчет с максимальной амплитудой $R(x_i)$. Это максимальный ошибочный пик.

В табл. 1–4 представлены результаты сравнения способов контурного препарирования [5] и предложенных способов препарирования по критерию отношения истинного/ошибочного пиков для массивов случайных и синусоидальных отсчетов фона при разнообразной степени зашумленности массивов равномерным и гауссовским шумом и разнообразной длине рангового вектора.

Development of the method of pyramidal spatially connected preparation

The problem of pattern recognition and image analysis in real time is connected with the necessity to provide invariance (i.e. non sensitivity) or reduced sensitivity to the turn of the pattern or analyzed image. The effective direction to achieve high efficiency is information compression of the image with simultaneous allocation of attributes invariant to the turn [3, 4]. The essence of generalized spatially connected preparation method is following.

m delayed signals are formed by the video signal delay on time τ_i for i -th delayed signal, where $i = \overline{1, m}$.

Simultaneously m of residual signals is formed and first two-gradation signal by two-level quantization relatively of prior generated threshold signal.

m delayed two-gradation signals are formed by delay of the first two-gradation signal on time τ_i for i -th delayed signal.

Then, simultaneous discretization is carried out, the period of discretization being T_d of differential signals forms, and memorize of discretization values, having period T_d .

Each memorized value is compared with positive and negative reference signals. By the results of comparison of memorized value of i -th discretized differential signal of i -th two gradation first signal comparisons having the duration equal to period T_d and single value in case of equality of memorized value or if this value exceeds negative reference signal or zero value in opposite case are formed.

By the results of comparison differential signal of i -th two gradation second signal of comparison with duration equal to period T_d and single value not exceeding memorized value over negative reference signal or zero value in opposite case is formed, as well as i -th two gradation third signal with duration equal to period T_d and single value, when memorized value is less than positive reference signal and greater than negative signal or zero value in opposite case is performed. Then the following formation of initial signals of positive, negative and zero preparations is carried out.

The characteristic feature of the suggested method is implementation of pyramidal processing, performed in the following way. Prior to formation of differential signals from input and m -delayed signals common signal and m -compared with it signals are allocated, and formation of each differential signal is carried out between allocated common signal and or of the signals being compared. Formation of the first two-gradation signal is performed by means of two-level quantizing of allocated common signals.

Further, the first additional two-gradation single value signal on condition that single values of the first and m -valued two gradational signals coincide or in case of zero value in opposite case. Simultaneously with discretization of differential signals additional two-gradation signal is discretized with T_d period, each value is memorized for period T_d , obtaining initial gating signal.

First, second, third total signals are formed by means of addition of m -values of first signals of comparison, m -second signals of comparison and m -third signals of comparison respectively. Thus, formation of signals of positive, negative and zero generalized preparations is performed

with values of the first, second, third total signal at single value of gating signal or zero value at zero value of gating signal correspondingly as a common signal we allocate $\frac{m}{2}$ delayed signal, and as signals being compared with it we allocate video signal and other delayed signals.

Corresponding hardware realization of the method of pyramidal spatially connected preparation is suggested and implemented by the authors in [5].

Variants of implementation of correlation-extreme method based on the method of generalized spatial-connected preparation

Thus, if frequency of discretization is selected correctly correlation of values of neighbouring elements of discretized image takes place. For this reason there is no need in absolute matching of peripheral elements in case of image turn and invariate to its turn is observed.

In general case location of central and peripheral elements can be random, even asymmetric. Nevertheless, it follows from the above mentioned material, that weaker sensitivity to the image turn takes place when peripheral elements coincide with peaks of regular polygon and are equidistant from the central element, which coincides with the center of this polygon and corresponds to $\frac{m}{2}$ delayed signal which requires special analysis, as a result of greater invariance to image turn of the suggested method as compared with known methods [3,4], the problem of selection of delay time set, is considerably simplified, which corresponds to central and peripheral elements of discretized image, to provide the formation of initial signals of generalized preparation, efficient for further recognition or analysis of the image.

Using the above-mentioned method of generalized spatially connected preparation for $N = 0$ case (separate case of the suggested method, for which the device allocates video signal as a general signal) the variants of realization of correlations extreme method are given. The given method is characterized by high noise immunity and adaptability to uncertainty and changeability of noise immune environment at the expense of previous pipeline formation of convolution sums of correlated images.

The idea of reduction of computation volume while image presentation in the form of noncomplete W -spectrum and simplification while previous processing of correlated images applying adaptive method of generalized contour preparation is used [4].

The idea of the stated method consists in definition of the image fragment, which includes most informative (according to changing criterion) background area, and correlation-extreme measurement of interframe shift of the given fragment with the following preparation of the measured shift to required shift of background, thus the sizes of fragment are intermediate between the size of dynamic object and extended background.

The mathematical model of extended object localization with previous convolutional summation of the image is reduced to performance of the following actions:

a) Decompose frame field of the 2-D image, size of $n \times n$ countings on $\left(\frac{n}{m}\right)^2$ fragments, by

the size $m \times m$ of countings and accumulate convolutions of fragments (average value of the counting sums by fragments): (1).

b) Memorize accumulated convolutions $\tilde{f}(k,l)$ of the current image (CI) and use them as convolutions $\bar{f}_g(k,l)$ of the delayed image (DI) in the following frame.

c) Choose a fragment (k_m, l_m) , for which module of the CI convolutions difference and DI is minimal (2).

d) Calculate the local differential threshold δ , necessary for contour preparation of selected fragment countings by pipeline accumulation of the sum $\tilde{f}^>$ of countings of large convolutions and the sum $\tilde{f}^<$ of smaller convolutions $\bar{f}(k,l)$ by fragment (k_m, l_m) : (3).

e) Form the array of contour preparations $q_f(i, j)$ by pipeline accumulation of the sums $S_f(i, j)$ by the region of each counting $\bar{f}(i, j)$: (4); and compare the result with local difference threshold δ : (5).

f) Memorize the array of contour preparations $\{q_f(i, j)\}$ of CI and issue it as the array $\{q_d(i, j)\}$ of DI in the following frame.

g) Correlation comparison of arrays $\{q_f(i, j)\}$ and $\{q_d(i, j)\}$, and definition of maximum coordinates of cross-correlation function (CCF) $X_{f \max}, Y_{f \max}$ is carried out.

e) Processing of coordinates of maximum CCF for CI and DI is performed, and coordinates of background shift, which are contained in selected fragment by the frame (6) are defining..

The comparative characteristic of the preparation methods

In research the influence of noise countings on one-dimensional signals of object and background counting was modeled. Two basic kinds of noise were considered: with uniform and normal (Gaussian) distributions of probability density. The amplitude of noise counting r_i at uniform distribution was defined as: (7).

The noise of signal counting was performed by addition of signal counting with the appropriate counting of noise. At normal distribution of probability density $P(x)$ the relation (8) occurs.

The mean square deviation is defined by the rule of «three-sigma» (9).

For noise countings, amplitude $x_i = 0, 1, 2, 3, \dots$ and expectation value, equal to zero define, probabilities (10) and array of noise counting is formed in which the quantity of noise countings with amplitude x_i corresponds to calculated probability $P(x_i)$ (11).

The signal-to-noise ratio was defined as the relation of true / fault peaks of the array of counting of rank cross-correlation function (RCCF). The value of true peak $R(x_u)$ of RCCF was defined by a priory set true background shift x_u . The value of the maximal fault peak is defined in the following way (12).

The countings, for which (12) are excluded from the countings array of RCCF.

From countings, which remained, the countings with maximal amplitude $R(x_i)$ is determined.

It is the maximal fault peak.

In Tab. 1—4 results of comparison of the contour preparation methods [5] and suggested preparation methods by criterion of the relation of true / fault peaks for the arrays of random and sinusoidal countings of the background at various degrees of array noise by uniform and Gaussian noise and various length of rank vector are presented.

Висновки

В даній роботі на основі концепції опису інформаційних полів у вигляді спектра просторової зв'язності складових його елементів представлено спосіб узагальненого просторово-зв'язаного препарування. На основі цього способу та паралельно-ієрархічного перетворення обчислюються функції порівняння, у тому числі кореляційна, з підвищеною точністю, завадостійкістю та інваріантністю до повороту, що дозволяє в подальшому реалізацію простого методу сегментації зображень. В дослідженнях удосконалено пірамідальний принцип узагальненого просторово-зв'язаного препарування, який дозволяє досягнути ефекту інваріантності до фіксованих кутів повороту зображення для різноманітних варіантів дискретизації та вибору величин порядкових значень часу затримки, програмне моделювання якого при обробці одновимірних масивів демонструє високу завадостійкість методу у разі зашумленості гауссовим шумом до 20 % фонового об'єкта.

Для проведення електронного моделювання синтезованих способів запропоновано пристрій [5], схема якого показана на рисунку, де:

1 — відеодатчик; 2 — АЦП; 3 — блок вибору фрагмента; 4 — блок обчислення локального різницевого порога; 5 — блок еталона; 7 — блок корелятора; 8 — блок обчислення результату.

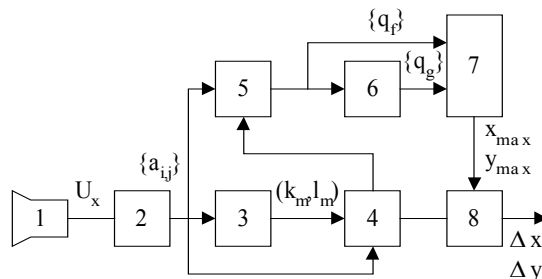


Рис. 1. Структурна схема пристрою аналізу локалізації протяжного об'єкта [5]

Рис. 1. Структурная схема прибора анализа локализации протяжного объекта [5]

Fig. 1. Block diagram of the device of localization plangent object analysis [5]

еталона; 7 — блок корелятора; 8 — блок обчислення результату.

Координати зсуву фону за допомогою системного контролера формують команду на зсув кадру ПЗ в блоці попередньої обробки на значення обернене отриманому зсуву. В блоці попередньої

обробки виконується віднімання зміщених кадрів ЕЗ і ПЗ, в результаті чого формується кадр зображення, в якому є об'єкт на нульовому фоні. Фрагмент даного кадру, який містить об'єкт, надходить до спеціалізованого процесора де знаходяться координати зсуву об'єкта.

Таким чином, моделювання запропонованих способів препарування при обробці одновимірних масивів демонструють високу завадостійкість способу при зашумленості гауссовим шумом фонового об'єкта [4, 5]. Результати моделювання системи кореляційного аналізу зображень та його складових частин [6] підтвердили правильність пірамідальних методів і схемотехнічних рішень, які забезпечують вимірювання координат зображення еталону в відеокадрі в умовах невизначеної завадосигнальної обстановки з похибкою вимірювання $\sim 5\%$.

Основні результати вказаних наукових досліджень доповідались та пройшли обговорення на міжнародних наукових симпозиумах «Optical Science and Technologies», що проводились в м. Сіетл, США в 2002 р. та м. Сан-Дієго, США в 2003 р. [7].

Выводы

В данной работе на основании концепции описания информационных полей в виде спектра пространственной связности составляющих его элементов представлен способ обобщенного пространственно-связанного препарирования. На основании этого способа и параллельно-иерархического преобразования вычисляются функции сравнения, в том числе корреляционная с повышенной точностью, помехоустойчивостью и инвариантностью к повороту, что позволяет в дальнейшем реализацию простого метода сегментации изображений. В исследованиях усовершенствован пирамидальный принцип обобщенного пространственно-связанного препарирования, который разрешает достичь эффекта инвариантности к фиксированным углам поворота изображения для разнообразных вариантов дискретизации и выбора величин порядковых значений времени задержки, программное моделирование которого при обработке одномерных массивов демонстрирует высокую помехоустойчивость метода при зашумленности гауссовым шумом до 20 % фонового объекта.

Для проведения электронного моделирования синтезированных способов предложено устройство [5], схема которого приведена на рисунке, где: 1 — видеодатчик; 2 — АЦП; 3 — блок выбора фрагмента; 4 — блок вычисления локального разностного порога; 5 — блок кодера; 6 — блок выбора эталона; 7 — блок коррелятора; 8 — блок вычисления результата.

Координаты сдвига фона с помощью системного контроллера формируют команду на сдвиг кадра ТИ в блоке предыдущей обработки на значение обратное полученному сдвигу. В блоке предыдущей обработки выполняется вычитание смещенных кадров ЗИ и ТИ, в результате чего формируется кадр изображения, в котором есть объект на нулевом фоне. Фрагмент данного кадра, который содержит объект, поступает в специализированный процессор, в котором находятся координаты сдвига объекта.

Таким образом, моделирования предложенных способов препарирования при обработке одномерных массивов демонстрируют высокую помехоустойчивость способа при зашумленности гауссовым шумом фонового объекта [4, 5]. Результаты моделирования системы корреляционного анализа изображений и его составных частей [6] подтвердили верность пирамидальных методов и схемотехнических решений, которые обеспечивают измерение координат изображения эталона в видеокадре в условиях неопределенной помехоустойчивой обстановки с погрешностью измерения $\sim 5\%$.

Основные результаты указанных научных исследований докладывались и прошли обсуждение на международных научных симпозиумах «Optical Science and Technologies», которые проводились в г. Сіетл, США в 2002 г. и г. Сан-Дієго, США в 2003 г. [7].

Conclusions

In the given work on the basis of the concept of the information fields description as a spectrum of spatial cohesion of composing elements, the method of generalized spatially connected preparation is offered.

On the basis of this method and parallel - hierarchical transformation the functions of comparison are calculated, including correlation function, with improved accuracy, noise stability and invariancy to turn, that allows further realization of simple segmentation method of the images.

In the given research, the pyramidal principle of generalized spatially connected preparation has been improved. The suggested method enables to achieve the effect of invariance regarding fixed turn angles of the image for various versions of discretization and selection of time delay values, programming modeling of which during processing of 1-D arrays demonstrates high noise

stability of the method if the content of Gaussian noise in background object reaches 20%.

To carry out electronic modeling the device is suggested [5]. The scheme of the device is given in Fig. : 1 — video sensor, 2 — analog-to-digital converter, 3 — block of fragment selection, 4 — block of calculation of local differential threshold, 5 — coder block, 6 — block of reference selection, 7 — block of correlator, 8 — block of results computation.

Background shift coordinates by means of system controller form CI frame shift command in the block of previous processing by the value, inverse to obtained shift. In the block of previous subtraction of DI and CI frames which are shifted is carried out, as a result image frame is formed where there is an object on zero background. The fragment of the given frame, which contains the object, enters specialized processor where shift coordinates of the object are located.

Thus, modeling of the suggested preparation methods in the course of processing of 1-D arrays demonstrate high noise stability of the method if the background object contains Gaussian noise [4, 5]. The results of modeling of the system of image correlation analysis and its components [6] proved the correctness of pyramidal method and circuit salutations, which provide measurements of reference image coordinates in video frame in case of uncertain noise proof environment, measurement error being ~ 5%.

Basic results of research were reported and discussed at the International scientific conferences held in Seattle, USA in 2002 and San Diego, USA in 2003 [7].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Гриценко В. И. Информатизация как проблема // УСИМ — 2001. — № 6.
2. В. П. Кожем'яко, Яровий А. А. Наукова концепція образного відео-комп'ютера око-процесорного типу в контексті сучасної методології штучного інтелекту // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2001. — №2. — С. 84—89.
3. Вступ в алгоритмічну теорію ієрархії і паралелізму нейроподібних обчислювальних середовищ та її застосування до перетворення зображень. Основи теорії пірамідально сільового перетворення зображень / Кожем'яко В. П., Тимченко Л. І., Кутаєв Ю. Ф., Івасюк І. Д. — К: УМК ВО, 1994. — 272 с.
4. Кожем'яко В. П., Кутаєв Ю. Ф., Чепорнюк С. В., Тимченко Л. И. Локализация протяженного объекта с предварительным сверточным суммированием изображения // Тр. I Всесоюзной конференции «Распознавание образов и анализ изображений: Новые информационные технологии» (РОАИ-91). — Минск: ИК БССР, 1991. — С. 66—69.
5. Образный видео-комп'ютер око-процесорного типу. Науковий проект 57-Д-249. Проміжний (річний) звіт / Вінницький державний технічний університет. Держ. реєстрація № 0102U002261. — Вінниця, 2002. — 107 с.
6. Kozhemyako V. P., Tymchenko L. I., Kutaev Yu. F., Yarovy A. A. Approach for real-time image recognition // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2002. — №1. — С. 110—124.
7. Leonid I. Timchenko, Yuriy F. Kutaev, Volodymyr P. Kozhemyako, Andriy A. Yarovy, Alexander A. Gertsy, Anatoliy T. Terenchuk, Nafez 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.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптоелектронної техніки

Надійшла до редакції 21.07.03
Рекомендована до друку 13.12.03

Кожем'яко Володимир Прокопович — завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, **Яровий Андрій Анатолійович** — старший викладач кафедри інтелектуальних систем, науковий співробітник кафедри лазерної та оптоелектронної техніки.

Вінницький національний технічний університет

Кожем'яко Владимир Прокопович — заведующий кафедрой лазерной и оптоэлектронной техники, **Яровой Андрей Анатоліевич** — старший преподаватель кафедры интеллектуальных систем, научный сотрудник кафедры лазерной и оптоэлектронной техники.

Винницкий национальный технический университет

Volodymyr Kozhemyako — Head of the Chair of Laser and Optoelectronic Engineering, **Andriy Yarovy** — Senior Lecturer of Intelligent systems Department, research officer of the Chair of Laser and Optoelectronic Engineering.

Vinnitsia National Technical University.