

**Л.И. ТИМЧЕНКО, А.А. ЯРОВОЙ, С.В. НАКОНЕЧНАЯ,  
Н.И. КОКРЯЦКАЯ**

Государственный экономико-технологический университет транспорта,  
Киев, Украина  
331747@mail.ru

## **ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ИЕРАРХИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Рассматриваются принципы построения многоуровневой параллельно-иерархической сети. В отличие от нейронных сетей в многоуровневых ПИ сетях присутствует при обработке в ее ветвях вычислительный алгоритм, что существенно повышает их функциональные возможности. Предложены модели параллельной обработки, которые представляют собой пирамидальный процесс преобразования числовых полей.

**Ключевые слова:** *системы с массовым параллелизмом, многоуровневые параллельно-иерархические сети.*

**ТИМЧЕНКО Л.И., ЯРОВОЙ А.А., НАКОНЕЧНАЯ С.В.,  
КОКРЯЦКАЯ Н.И.**

State University for Transport Economy and Technologies, Kyiv, Ukraine

## **PRINCIPLES OF ORGANIZATION OF PARALLEL- HIERARCHICAL MULTILEVEL NETWORKS**

The principles of constructions of parallel-hierarchical multilevel network are examined. Unlike neural networks in parallel-hierarchical multilevel networks when processing in its branches there is a computational algorithm that considerably enhances their functionality. The models of parallel processing are suggested these models representing a pyramidal process of converting numeric fields.

**Keywords:** *systems with mass parallelism, parallel-hierarchical multilevel network.*

### **Введение**

Бурное развитие компьютерных технологий и создание семейств высокопроизводительных микропроцессоров привело к тому, что доминирующими направлениями разработок многопроцессорных ВС на данный

момент являются системы с массовым параллелизмом (СсМП), содержащие тысячи параллельно функционирующих процессоров, соединенных между собой соответствующей коммутационной системой. Важно отметить, что современные высокопроизводительные ВС являются мультиархитектурными. Для таких систем характерно введение дополнительных специализированных ресурсов, а также иерархическая организация и различные пропускные способности каналов связи между ресурсами, в результате чего ВС становится гетерогенной. Все больше прослеживается тенденция в области высокопроизводительных вычислений к конвергенции современных технологий параллельной и распределенной обработки информации. Однако перед разработчиками гетерогенных ВС возникают задачи, связанные с неоднозначностью выбора возможных вариантов построения и комбинаций функциональных блоков, которые могут быть реализованы различными компьютерными средствами. Данные задачи нуждаются в исследовании и применении новых подходов к организации высокопроизводительных гетерогенных ВС, поскольку правильный выбор конкретных средств их реализации имеет важное значение для достижения нужных технико-экономических показателей.

Большинство существующих методов организации параллельных вычислений в СсМП ориентированы на решение сложных задач адаптации вычислительного алгоритма к структуре многопроцессорной ВС. В связи с этим, актуализируются исследования, связанные с разработкой новых теоретических основ и методов построения высокопроизводительных многопроцессорных ВС, в частности параллельно-иерархических вычислительных систем. В их основе лежит принцип параллельно-иерархической (ПИ) обработки информации. Он предполагает организацию многоуровневого ПИ вычислительного процесса, ориентированного на достижения максимально возможного алгоритмического и схемотехнического быстродействия при преобразовании информации, а также минимально возможных параметров емкости памяти и потребляемой мощности для ее сохранения, с опережающим ростом функциональных возможностей технических средств по сравнению с их сложностью.

Принцип функционирования многоуровневой ПИ сети, можно определить как последовательность операций над множеством массивов данных, образующих множества информационных полей (ИП) различных уровней иерархии. Взаимодействие между указанными уровнями иерархии осуществляется в пределах пирамидальной иерархической структуры и реализуется на основе многоуровневых ПИ сетей. Необходимо отметить, что указанные сетевые преобразования являются нелинейными преобразованиями, ядра которых можно представить в виде сетевой модели [1].

Принципиальное отличие пирамидального многоуровневого ПИ преобразования [1-3] от разложения в такие известные ряды, например, как ряд Тейлора или ряд Фурье заключается в том, что в первом случае разложение представляет собой степенной ряд с коэффициентами, вычисляемыми только по локальным характеристикам (производными) сигнала, тогда как для второго случая - члены ряда Фурье представляют собой обобщенные характеристики сигнала, но другой физической природы (например, амплитуды спектральных частот), чем сам сигнал.

### Принципы построения многоуровневой параллельно-иерархической сети

Принцип построения пирамидальной иерархической структуры данных заключается в следующем: с начального ИП формируют последовательности массивов данных того же ИП, но на различных иерархических уровнях распределения:  $P=(A_0, A_1, A_2, \dots, A_n)$ , где  $A_1$  - информационное поле,  $i$  - номер иерархического уровня распределения. Такая пирамида ИП, в свою очередь, формирует вычислительную структуру многоуровневой ПИ сети (рис. 1).

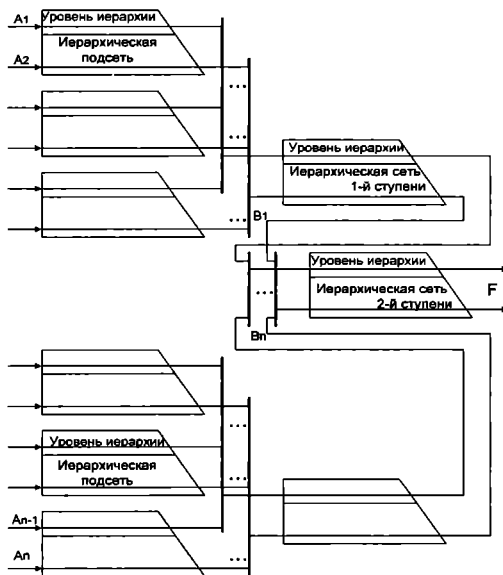


Рис. 1. Принцип структурной организации многоуровневых ПИ сетей

Такая структура позволяет управлять иерархическими уровнями распределения обрабатываемых данных, а также размерами области их анализа (что актуально при анализе изображений).

Принцип организации вычислительного процесса в многоуровневых ПИ сетях приведен на рис. 2 ( $A_i, B_i, C_i$  – массивы данных,  $i = \overline{1, \dots, n}$ ;  $F$  – результат ПИ преобразования). В частности, на рисунке приведен фрагмент организации потоков в многоуровневой ПИ сети. А именно: с начального ИП формируют последовательности массивов данных (рассматриваемые фрагменты данных)  $A_1, \dots, A_n$ , над которыми осуществляют ПИ преобразования. В результате обработки на первом иерархическом уровне ПИ сети получают промежуточный результат в виде векторов хвостовых элементов ПИ преобразования. Тогда формируют новые матрицы  $B_1, \dots, B_n$  и заполняют их (по столбцам) полученными на первом иерархическом уровне хвостовыми элементами. Далее, полученные матрицы  $B_i$  группируют в новые последовательности массивов данных и выполняют над ними ПИ преобразования. В результате обработки на втором иерархическом уровне ПИ сети снова получают промежуточный результат в виде векторов хвостовых элементов ПИ преобразования.

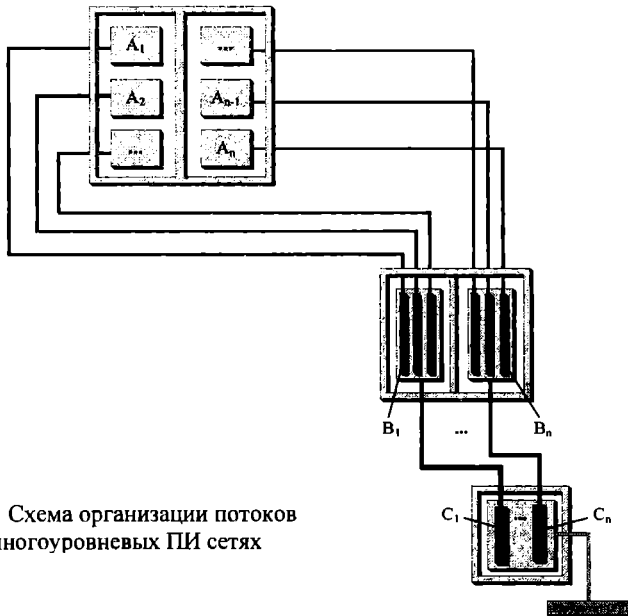


Рис. 2. Схема организации потоков в многоуровневых ПИ сетях

Данный процесс итеративно повторяется до получения окончательного результата ПИ преобразования. В частности, в приведенном на рис. 2 примере формируют новые матрицы  $C_1, \dots, C_n$  и заполняют их (по столбцам) полученными хвостовыми элементами, над которыми снова выполняют ПИ преобразования. В результате обработки на третьем иерархическом уровне ПИ сети получают окончательный результат (F) в виде вектора хвостовых элементов ПИ преобразования.

Размеры анализируемого фрагмента (далее, окна) данных могут быть постоянными, но, перемещаясь из одного иерархического уровня распределения на другой, можно осуществлять обработку того же элемента ИП с различной степенью детализации. При этом решение о необходимости дальнейшей обработки можно принять на верхнем уровне обработки после анализа ИП с малым распределением, каждый элемент которого содержит интегральные оценки о соответствующих фрагментах исходного ИП на низком уровне. Это приводит к повышению скорости обработки ИП. Таким образом, сущность пирамидального подхода заключается в одновременном использовании последовательности массивов данных на различных уровнях иерархии при анализе изображения, позволяющей реализовать стратегию от "общего к частному". Каждый элемент пирамиды ИП характеризуется тремя координатами  $(i, j, k)$ , где  $i$  - строка,  $j$  - столбик,  $k$  - уровень. ПИ сети пирамидального типа позволяют подать в кодированном, а также уплотненном виде (в качестве элементарных) такие числа ИП, одновременно имеют как количественную, так качественную ПВ оценки - это блоки различных иерархических уровней. Развивая вышеописанный подход, в перспективе представляется возможным реализовать методы интеллектуального сенсорного восприятия [1, 2].

Для выявления временных закономерностей организации вычислительного процесса в многоуровневых ПИ сетях рассмотрим модель формирования многоуровневой сетевой структуры. Пусть имеется  $n$  входных каналов, причем все каналы начинают работу одновременно в момент времени  $t_0$ . Итак, в момент времени  $t_0$  на входы поступают  $n$  числа, что образуют множество  $M_0 = \{a_{i_0}\}$ ,  $i_0 = \overline{1, n_0}, a_{i_0} \in R$ . В момент времени  $t_1$  из множества  $M_0$  по заранее определенному критерию выбирается элемент. Обозначим выбранный элемент через операцию дизъюнкции:

$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (a_{i_0})^{r^{t_1}},$$

где  $r^{t_1}$  - кратность этого элемента.

В момент времени  $t_2$  образуется новое множество  $M_2 = \{a_{i_2}\}$ ,  $i_2 = \overline{1, n_2}$ . Элементами этого множества есть (отличные от нуля) разности:

$$a_{i_0} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (a_{i_0})^{i_1} = \Delta(a_{i_0})^{i_1}.$$

Количество элементов множества  $M_2$  равно  $n_2 = n_0 - r^{i_1}$ .

В момент времени  $t_3$  по описанному выше установленному критерию с множества  $M_3$  снова выбирается элемент. Обозначим его:

$$\bigcup_{i_2=1}^{n_2} (a_{i_2})^{i_3} = \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta(a_{i_0})^{i_1})^{i_3},$$

где  $r^{i_3}$  – кратность этого элемента.

В момент времени  $t_4$  образуется новое множество  $M_4 = \{a_{i_4}\}$ ,  $i_4 = \overline{1, n_4}$ . Элементы являются (отличные от нуля) разности:

$$a_{i_2} - \bigcup_{i_2=1}^{n_2} (a_{i_2})^{i_3} = \Delta(a_{i_0})^{i_1} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta(a_{i_0})^{i_1})^{i_3} = \Delta^2(a_{i_0})^{i_1 i_3}.$$

Количество элементов множества  $M_4$  равно  $n_4 = n_0 - (r^{i_1} + r^{i_3})$ .

При образовании каждой из новых множеств в результате преобразования обращается в нуль подмножество элементов, равных выбранной в предыдущий момент времени.

Предположим, что в момент времени  $t = t_{2j}$  было образовано множество  $M_{2j}$  с элементами:

$$\Delta^j(a_{i_0})^{i_1 i_3 \dots i_{2j-1}} = \Delta^{j-1}(a_{i_0})^{i_1 i_3 \dots i_{2j-1}} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j-1}(a_{i_0})^{i_1 i_3 \dots i_{2j-1}})^{i_{2j-1}}, \quad (1)$$

причем

$$(a_{i_0})^{i_{2j-1}} \equiv a_{i_0}; \Delta^0(a^{i_0}) \equiv a_{i_0}.$$

При  $j=1$  и  $j=2$  последнее равенство описывает преобразования, что соответствует моментам времени  $t = t_2$  та  $t = t_4$ .

В момент времени  $t = t_{2j+1}$  с множества  $M_{2j}$  выбирается элемент:

$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^j(a_{i_0})^{i_1 \dots i_{2j-1}})^{i_{2j+1}}, \quad (2)$$

где  $r^{i_{2j+1}}$  – кратность этого элемента.

В момент времени  $t = t_{2j+1}$  образуется новое множество

$$M_{2j+2} = \{a_{i_{2j+2}}\}, \quad i_{2j+2} = \overline{1, n_{2j+2}}.$$

Ее элементами являются отличные от нуля разницы:

$$\Delta^j(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j-1}} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^j(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j-1}})^{t_{2j+1}} = \Delta^{j+1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j+1}}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta^{(j+1)-1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2(j+1)-3}} - \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{(j+1)-1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2(j+1)-3}})^{t_{2(j+1)-1}} = \\ = \Delta^{j+1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2(j+1)-1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Далее, в момент времени  $t = t_{2j+3}$  с множества  $M_{2j+2}$  по установленному критерию выбирается элемент

$$\bigcup_{i_{2j+2}=1}^{n_{2j+2}} (a_{i_{2j+2}})^{t_{2j+3}} = \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j+1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j+1}})^{t_{2j+3}},$$

его кратность равняется  $r^{t_{2j+3}}$ . Также выбранный элемент можно записать в виде

$$\bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j+1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2(j+1)-1}})^{t_{2(j+1)+1}}. \quad (4)$$

Если множество  $M_0$  состоит из  $m$  различных подмножеств, образованных одинаковыми элементами, то последнее действие имеет номер  $m$ . То есть в момент времени  $t = t_m$  образуется множество  $M_{2m} = \emptyset$ . Тем самым процесс обработки информации завершён. Исходному множеству  $M_0$  размерности  $n_0$  ставится в соответствие множество элементов

$$\left\{ r^{t_{2j-1}} \bigcup_{i_0=1}^{n_0} (\Delta^{j-1}(a_{i_0})^{t_1 \dots t_{2j-3}})^{t_{2j-1}} \right\}$$

размерности  $m$ ,  $j = \overline{1, m}$ , где  $m \geq n_0$ .

Итак, с (3) и (4) следует, что предложенные выражения (1) и (2) являются правильными как для  $j$ -го действия, так и для  $(j+1)$ -го действия. Тем самым по методу математической индукции доказано, что выражения (1) и (2) описывают произвольное  $j$ -е действие пирамидального процесса преобразования ИП.

Необходимо отметить, что "пирамидальность" приведенного процесса обработки является естественной. Ведь действительно, в процессе обработки с каждым шагом количество чисел уменьшается. Если множества получаемые после каждого шага, поставить последовательно друг на друга, то образуемый ими трехмерный контур будет иметь форму пирамиды [4]. Проиллюстрируем это на числовом примере. Пусть ИП задано в виде

массива данных  $M = \{5, 8, 9, 10, 12, 10, 9, 9\}$ . Здесь  $n = 8$ ;  $m = 5$ ;  $\sum_{i=1}^8 a_i = 72$ , где  $n$  - количество элементов массива;  $m$  - количество итераций процесса преобразования ИП;  $\sum_{i=1}^8 a_i$  - сумма элементов  $M$ . Согласно предложенной модели процесс пирамидальности [5] в многоуровневых ПИ сетях можно представить в следующем виде (табл. 1).

Таблица 1. Пример пирамидального ПИ преобразования

Числовые поля								Результат итерации процесса преобразования
5	8	9	10	12	10	9	9	$5 \times 8 = 40$
0	3	4	5	7	5	4	4	$3 \times 7 = 21$
x	0	1	2	4	2	1	1	$1 \times 6 = 6$
x	x	0	1	3	1	0	0	$1 \times 3 = 3$
x	x	x	0	2	0	x	x	$2 \times 1 = 2$
Сумма промежуточных результатов: 72								

Промежуточные результаты пирамидальной обработки используются для дальнейших вычислений. Согласно к свойствам ПИ сетей сумма всех промежуточных результатов вычислений (уровней пирамидального процесса) равна сумме всех исходных чисел, что видно из табл. 1.

Таким образом, ПИ преобразование пирамидального типа предполагает внутри и вне каждого иерархического уровня тот же закон перехода от одного уровня к другому. Необходимо также отметить, что этот закон формулируется относительно группы множеств элементов ИП нижнего уровня и промежуточной группы множеств элементов преобразованных данных всех последующих уровней. То есть, для построения ПИ сети на алгоритмическом и структурном уровнях задается только правило преобразования группы множеств элементов данных, которые потом распространяются по "горизонтали" - на другие элементы и по "вертикали" - на элементы других иерархических уровней распределения. Указанное правило описывает и схему преобразования исходных данных, и результирующую структуру данных и алгоритм обработки. Естественным способом описания ПИ структуры взаимосвязей элементов является рекурсия. Для ее построения достаточно указать размерность множеств, закон распределения вероятностей величин их элементов,  $Q^*$  - преобразование и  $F^*$  - критерий [6].



Иными словами, для построения структуры преобразования сохраняется лишь некоторый основной признак, своеобразная "хэш-функция" ("информационный ген"), и принцип развития самой структуры ПИ сети, последовательное применение которого позволяет поэтапно разворачивать выходное описание по степени детализации [3].

### **Выводы**

Высокопроизводительную систему обработки информации можно получить только приспособлением архитектуры под соответствующую структуру данных. Однако структура данных в процессе пирамидальной обработки меняется от большого фиксированного массива на нижнем уровне до небольшой гибкой структуры на верхнем. В этом контексте, значительный интерес представляют однородные нераспределенные вычислительные структуры, соответствующие классу мульти-SIMD систем, в которых несколько уровней идентичных процессорных элементов (ПЭ) работают автономно в SIMD-режиме. Каждый уровень содержит большое количество простых ПЭ. Каждому ПЭ соответствует элемент изображения на соответствующем иерархическом уровне распределения.

В более сложном случае, в частности, формировании однородных распределенных пирамидальных вычислительных структур, несколько мощных идентичных процессорных блоков объединяются в иерархическую пирамидальную структуру. Каждому процессорному блоку соответствует часть обрабатываемых данных. Такая пирамидальная система может функционировать как в SIMD-, так и в MIMD-режимах [2].

В отличие от широко распространенных нейронных сетей [7] в многоуровневых ПИ сетях присутствует при обработке в ее ветвях вычислительный алгоритм, что существенно повышает их функциональные возможности. В частности, это преимущество особенно явно проявляется при организации обучения в таких сетях [6, 8], в которых используются вычислительные свойства алгоритма ПИ сети.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении связаны с разработкой обучающего алгоритма на основе использования структуры сети, формирующейся из цепочек последовательностей структур ПИ сетей. В этом случае алгоритм обработки изображения с использованием многоуровневой ПИ сети позволит обрабатывать изображения частями, т.е. окнами определенной размерности. При этом окна (см. рис. 2) обрабатываются независимо, что позволит использование таких ПИ сетей для

разных окон параллельно в согласовании с пирамидальной схемой. Это даст возможность более полного использования перспективных технологий параллельных гетерогенных вычислений на основе General-Purpose Computing on Graphics Processing Units (GPGPU) для обработки динамических изображений протяженных лазерных трасс [9, 10] и прогнозирования их характеристик в реальном времени.

#### *Список литературы*

1. Кожем'яко В.П., Тимченко Л.І., Кутаев Ю.Ф., Івасюк І.Д. Вступ в алгоритмічну теорію ієрархії і паралелізму нейроподібних обчислювальних середовищ та її застосування до перетворення зображень. Основи теорії пірамідально сільового перетворення зображень. Київ: УМК ВО. 1994.
2. Рабинович З.Л. О думающих машинах и интеллектуальных ЭВМ. // Кибернетика, 2003. № 5. С. 83–88.
3. 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, 2005.
4. Тимченко Л. І. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель ефективних засобів штучного інтелекту. Автореферат дисертації д-ра техн. наук: 05.13.23 / Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури. Львів, 2002.
5. Gladun V.P. Decision planning. Kiev: Nauk. Dumka, 1987.
6. Тимченко Л.І., Свечников С.В., Кокряцкая Н.И., Івасюк І.Д., Мельников В.В., Макаренко Р.В. Паралельно-ієрархіческие сети: Монографія. К.: ЗАО "Випол", 2010.
7. Haykin S. Neural Networks. – 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 1104. 1999.
8. Тимченко Л.І., Мельников В.В., Кокряцкая Н.И. Метод организации параллельно-ієрархіческой сети для распознавания образов.// Кибернетика и системный анализ, 2011. № 1. С. 152-163.
9. Leonid I Timchenko, Nataliya I Kokryatskaya, Viktoriya V Shpakovych "Modeling of a method of parallel hierarchical transformation for fast recognition of dynamic images".// EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013. 87. P. 1-14.
10. Timchenko L.I., Kokryatskaya N.I., Melnikov V.V., Kosenko G.L. Method of forecasting energy center positions of laser beam spot images using a parallel hierarchical network for optical communication systems". //J. Opt. Eng., 2013. 52 (5). doi: 10.1117/1.OE.52.5.055003.