

нижніх рівнів без врахування наступних міжблочних з'єднань. Підсумовуючи зазначені міркування, сформулюємо алгоритм побудови МЗД для всіх елементів на ДТРП.

**Алгоритм Ш1 (декомпозиційний).**

П1. Побудова дерева згортання елементів (контактів) ланцюга згідно з критеріями і обмеженнями на згортання.

П2. Побудова смуг невизначеності МЗД між блоками різних рівнів.

П3. Уточнення координат МЗД від блоків нижчих до блоків вищих рівнів.

Складність алгоритму визначається складністю алгоритму побудови дерева згортання  $O(n^2)$  і складністю алгоритму побудови смуг невизначеності між блоками  $O(n)$ , який реалізований за допомогою двох способів: алгебраїчних перетворень і хвильового алгоритму. Приклади часової залежності алгоритму для різної кількості контактів наведено в наступній таблиці.

кількість	100	150	200	250	300
довжина	136	136	133	137	169
час	0.83 с.	2.74 с.	6.7 с.	11.53 с.	21.25 с.

1. A.V.Kahng and G. G.Robins. A new class of iterative steiner tree heuristics with good perfomance. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, vol.11, No.7, pp.893-902, July 1992.

2. Мельник Р.А. Розбиття схем на основі методу оптимального згортання з нечіткими характеристиками вершин дерева // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998, № 351, с.82-86.

УДК 621.378 : 681.3

**Муравський Л.І., Кулинич Я.П., Вороняк Т.І.**

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

## **ОПТИКО-ЦИФРОВА СИСТЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФАЗОВИХ МАСОК**

© Муравський Л.І., Кулинич Я.П., Вороняк Т.І., 2000

**На базі архітектури корелятора спільного перетворення Фур'є створено макет гібридної оптико-цифрової системи ідентифікації фазових та трансформованих фазових масок. Проведена оцінка мінімальних розмірів оптичної ланки системи. Наведена процедура ідентифікації трансформованих масок, що вводяться на вхід системи. Отримано і проаналізовано залежності співвідношення пік/шум для кореляційних піків, що формуються на виході системи, від ефективної фокусної віддалі оптичної ланки системи та від розмірів апертури реєстрації спільного енергетичного спектру.**

**Вступ.** В останні роки досить суттєвими є досягнення у розвитку нових високо-ефективних методів оптичного захисту [1]. Серед нових методів слід виділити так званий метод охоронної перевірки, який забезпечує значно вищий рівень захисту кредитних карток, документів і виробів від підробки порівняно з відомими методами [2]. Цей метод

передбачає використання випадкових фазових масок, що як оптичні мітки вводяться на вхід оптичного або гібридного оптико-цифрового корелятора. На відміну від нанесених на об'єкт захисту оптичних міток у вигляді голограм і дифракційних ґраток та інших дифракційних картин, які порівняно легко репродукувати з метою підробки сучасними засобами копіювання, реєстрації та відтворення зображень (наприклад, зареєструвати телевізійною камерою на пристрої з зарядовим зв'язком (ПЗЗ-камерою) і ввести в комп'ютер для підробки), випадкові фазові маски, що містять сотні тисяч фазових елементів, підробити надзвичайно складно. Такі маски неможливо проаналізувати за допомогою мікроскопа, сфотографувати, зчитати сканером або зареєструвати за допомогою ПЗЗ-камери.

Розроблена в [3-6] методика оптичного захисту та ідентифікації оптичних міток у вигляді так званих трансформованих фазових масок дозволяє ще більше піднести рівень захисту цінних паперів та інших об'єктів за рахунок декодування кожного фрагмента трансформованої маски, що, з одного боку, дозволяє ідентифікацію порівнянням ознакових просторів, сформованих на виході кореляційної системи, з еталонним ознаковим простором, а з іншого – сприяє розробці нових підходів до створення високонадійних пристроїв оптичного захисту.

На основі вищезгаданих методів оптичного захисту розроблено декілька експериментальних макетів систем, що їх реалізують [5-8]. Побудова всіх цих макетів базувалась на архітектурі корелятора спільного перетворення Фур'є (СПФ), яка порівняно з архітектурою корелятора Вандер Люгта має суттєві загальновідомі переваги [9], основними з яких слід вважати відсутність узгодженого фільтра, який необхідно досить точно юстувати в кореляторі Вандер Люгта, а при зміні вхідного зображення використовувати інший узгоджений фільтр. Ці переваги стають особливо привабливими при розробці гібридних систем, в яких одна частина операцій над вхідними інформаційними масивами здійснюється засобами когерентної оптики, а інша – засобами цифрової техніки. Тому створений нами макет оптико-цифрової системи (ОЦС) ідентифікації фазових масок також базувався на архітектурі корелятора СПФ.

**Структура оптико-цифрової системи.** ОЦС ідентифікації фазових масок порівняно зі своїми оптичними аналогами [5-8] має переваги, основними з яких є проста конструкція, значно менший рівень оптичних шумів, що генеруються оптичними елементами, і більш високий рівень надійності завдяки малим габаритам оптичної частини системи. До недоліків системи належить порівняно низька швидкодія виконання операції швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) спільного енергетичного спектру (СЕС) від еталонного і вхідного зображень, зареєстрованого ПЗЗ-камерою. Для досягнення швидкодії, сумірної з швидкістю реєстрації зображень в стандартних телевізійних ПЗЗ-камерах, необхідно створити спецпроцесор, в якому операція ШПФ над інформаційними масивами з розмірностями не менше ніж  $256 \times 256$  піксель виконується за час, що не перевищує 40 мс. Структура ОЦС, як і структура оптичних систем ідентифікації фазових масок, також складається з двох каскадів фур'є-перетворення двовимірних інформаційних масивів. Однак, якщо перший каскад ОЦС, в якому за допомогою фур'є-об'єктива реалізується операція сумісного фур'є-перетворення, є стандартним когерентно-оптичним фур'є-процесором [10], то другий каскад, в якому реалізується операція зворотнього перетворення Фур'є зареєстрованої інтерференційної картини, є електронним. У цьому каскаді операції захоплення і аналогово-цифрового перетворення двовимірного інформаційного масиву, що є дискретним зобра-

женням зареєстрованої інтерференційної картини СЕС, поєднуються з операцією ШПФ перетвореного у цифрову форму масиву та з подальшими операціями фільтрації отриманого кореляційного сигналу і його ідентифікації. Для реалізації операції ШПФ двовимірних інформаційних масивів в гібридному кореляторі СПФ найкраще використовувати відомі алгоритми ШПФ [11]. В другому каскаді ОЦС в процесі виконання алгоритму зворотнього ШПФ зареєстрованої інтерференційної картини можна також паралельно або послідовно реалізовувати алгоритми усунення шумів і завад, які вживають як у вхідній картині, так і у вихідному розподілі кореляційного поля. Крім того, можна використовувати і інші алгоритми попередньої обробки зображень, наприклад, поворот зображень, їх дзеркальні та інші просторові трансформації, різноманітні види фільтрації, оконтурення тощо.

На рис. 1 наведена схема експериментального макету ОЦС. Макет містить лазерний діод ЛД з потужністю випромінювання 1.0 мВт ( $\lambda_w = 635$  нм), коліматор К, когерентно-оптичний фур'є-процесор ОФП, що містить фур'є-об'єктив  $\Phi O$  і розсіювальну лінзу РЛ, чорно-білу ПЗЗ-камеру (ПЗЗ) типу SANYO (модель VCB-3512P) з ПЗЗ-матрицею розмірністю  $795 \times 596$  піксель, фрейм-граббер ФГ, монітор М, персональний комп'ютер ПК.

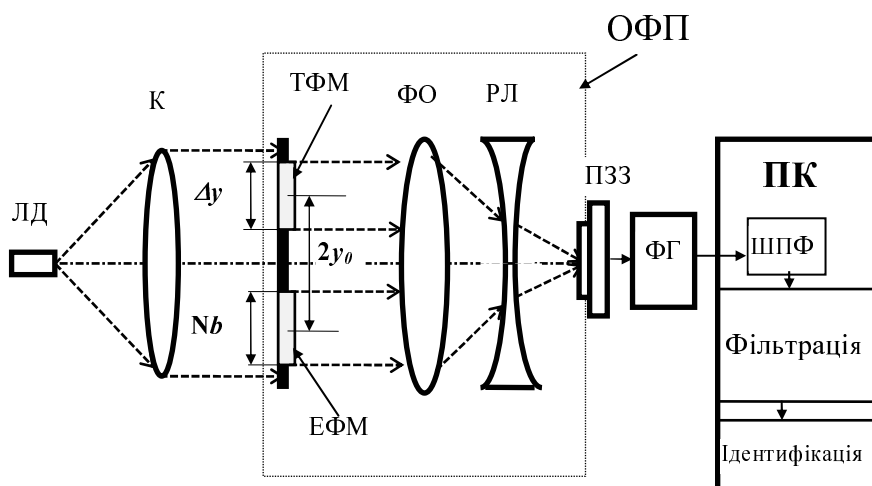


Рис. 1. Схема експериментального макету гібридного оптико-цифрового корелятора СПФ

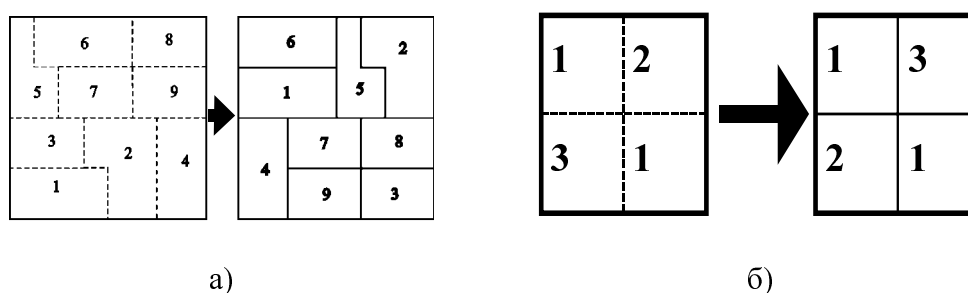


Рис. 2. Схема формування трансформованих фазових масок: а) дев'ятифрагментної, б) трифрагментної

Як еталонне зображення використовувалась бінарна фазова маска розмірністю  $M \times N = 256 \times 256$  піксель. Розмір кожного пікселя становив  $a \times b = 20 \times 20$  мкм. Як вхідні зображення використовувались трансформовані бінарні фазові маски, процедура формування яких описана в [3-6]. Для виготовлення усіх трансформованих масок використовувалась

та сама вихідна випадкова бінарна амплітудна маска, що і для виготовлення еталонної бінарної фазової маски. Однак при виготовленні трансформованих масок ця картина розділялась на окремі фрагменти, як це показано на рис. 2.

Еталонна і трансформована ФМ вводились на вхід когерентно-оптичного фур'є-процесора і освітлювались або паралельним, або розбіжним монохроматичним пучком світла, що генерувався ЛД ( $\lambda_w = 635$  нм). На виході фур'є-процесора формувалась інтерференційна картина СЕС від еталонної і трансформованої масок, яка реєструвалась ПЗЗ-камерою, захоплювалась фрейм-граббером ФГ і перетворювалась в двомірний цифровий масив (цифрове зображення) з розмірністю  $512 \times 512$  за 40 мс. Цифрове зображення СЕС вводилось в ПК, в якому за допомогою розробленої програми, що реалізує алгоритм двовимірного ШПФ, формувалось вихідне кореляційне поле з кореляційними піками в перших дифракційних порядках, при цьому положення кожного піка у вихідній площині визначалось положенням відповідного фрагмента трансформованої маски на вході системи.

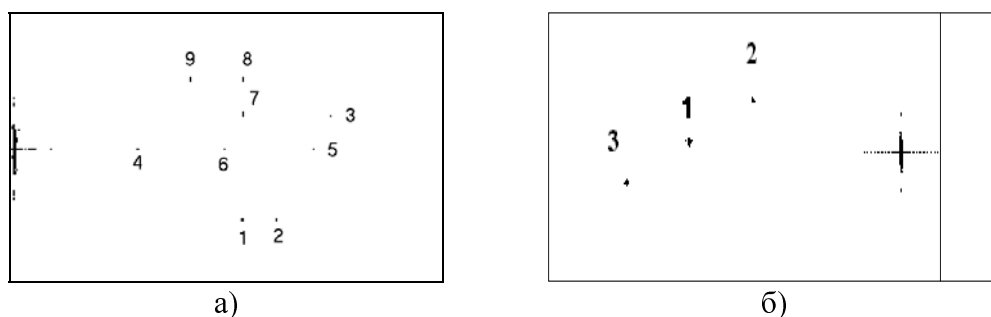


Рис. 3. Кореляційні сигнали на виході ОЦС при вводиті на вхід дев'ятифрагментної (а) і трифрагментної (б) трансформованих фазових масок

На рис. 3 зображені кореляційні сигнали від дев'ятифрагментної (а) і трифрагментної (б) масок на виході експериментального макета гібридного корелятора СПФ, де номер кожного піка відповідає номеру фрагмента в трансформованій масці, який при кореляції з відповідним фрагментом еталонної маски формує цей пік.

**Процедура ідентифікації трансформованих фазових масок.** Процедура ідентифікації трансформованих масок полягає у порівнянні ідентифікаційного вектора ознак (ВО) з еталонним ВО [5,6]. Для формування еталонного ВО використовувались дані про просторове розташування усіх  $K$  фрагментів трансформованої маски. Ці дані найвигідніше подати у вигляді різницевого вектора зміщення  $\vec{d}_{k',k''}$ , що дорівнює різниці між вектором зміщення  $\vec{d}_{k'}$   $k'$ -го фрагмента зі свого початкового положення в еталонній масці та вектором зміщення  $\vec{d}_{k''}$   $k''$ -го фрагмента зі свого початкового положення в цій же масці, тобто  $\vec{d}_{k',k''} = \vec{d}_{k'} - \vec{d}_{k''}$ . Вся множина векторів  $\vec{d}_{k',k''}$ , або їх модулів  $d_{k',k''}$ , формує еталонний ВО. Схематично процедура формування еталонного ВО зображена на рис. 3. Оскільки на виході ОЦС кожен  $k$ -ий пік формується як результат кореляції  $k$ -го фрагмента трансформованої маски з відповідним фрагментом еталонної маски, то векторна віддаль  $\vec{d}_{k',k''}$  між  $k'$ -им і  $k''$ -им піками в двох перших дифракційних порядках при масштабній інваріантності прямого і зворотнього перетворень Фур'є в ОЦС буде дорівнювати відповідному

різницевому вектору  $\vec{d}_{k',k''}$ . Множина всіх векторних віддалей між піками в одному з порядків дифракції формує ідентифікаційний ВО (рис. 4). Отже, якщо трансформована маска є аутентичною, то ідентифікаційний ВО повинен збігатися з еталонним ВО з наперед заданою допустимою похибкою. Якщо ж маска не є аутентичною, то вектори між собою не співпадають. Розроблене програмне забезпечення для реалізації вказаної процедури дозволило ідентифікувати трансформовані фазові маски у створеній ОЦС.

**Оптимізація геометричних та габаритних параметрів ОЦС.** При розрахунку габаритних параметрів ОЦС треба довести систему до таких мінімальних габаритів, при яких ще зберігаються всі її функціональні можливості. Визначальними при цьому є розміри еталонної і трансформованої фазових масок, розміри їх дифракційних елементів (пікселів) та віддалей між ними на вході системи. Для даного макета вибиралась відстань між масками, що дорівнювала  $2y_0 = 8$  мм. При такій відстані між масками масштаб СЕС в частотній площині гібридного корелятора вибирався за можливістю реєстрації та передавання просторових частот ПЗЗ-камерою, які обмежені частотою Найквіста  $\nu_N$ . Ця частота для ПЗЗ-камери з матрицею розмірністю  $795 \times 596$  піксель і з розмірами пікселя  $l_h \times l_v = 8$  мкм  $\times$  8 мкм визначається з відомого виразу  $\nu_N = (2l_h)^{-1} = (2l_v)^{-1}$  і дорівнює  $62.5$  мм $^{-1}$ , де  $l_h$  – горизонтальний розмір пікселя,  $l_v$  – його вертикальний розмір. Для того, щоб в інтерференційній картині СЕС всі просторові частоти не перевищували частоти Найквіста  $\nu_N$ , необхідно вибрати такий масштаб СЕС, при формуванні якого віддаль  $f'$  між фур'є-об'єктивом та площиною розташування ПЗЗ-матриці не була б меншою за віддаль

$$f_N = \frac{2l_v \left( y_0 + \frac{Nb}{2} \right)}{\lambda_w} = \frac{\left( y_0 + \frac{Nb}{2} \right)}{\nu_N \lambda_w} = 330.6 \text{ мм.}$$

Для оптимізації геометричних та габаритних параметрів ОФП проводилась серія досліджень, пов'язаних з обчисленням співвідношення пік/шум (СПШ) для кореляційних піків у першому дифракційному порядку при різних ефективних фокусних віддальях  $f_c$  процесора. При цьому для обчислення СПШ використовувалась така метрика:

$$\text{СПШ} = \frac{P_k^2 - \overline{n_{i,j}^2}}{\left[ \text{var}(n_{i,j}^2) \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

де  $P_k^2$  – інтенсивність  $k$ -го піка,  $n_{i,j}^2$  – інтенсивність  $i, j$ -го відліка оточуючого пік шуму за межами 50% інтенсивності піка, але в межах вікна  $11 \times 11$ .

Для оцінки впливу розмірності операції ШПФ на співвідношення пік/шум на виході гібридного корелятора цифровий масив зареєстрованого зображення з розмірністю  $512 \times 512$  піксель був трансформований в цифрові масиви більшої розмірності:  $1024 \times 1024$  і  $2048 \times 2048$  піксель. Аналіз вихідних кореляційних розподілів, отриманих в результаті ШПФ цифрових зображень СЕС з масивами різної розмірності, показав, що починаючи з розмірності  $512 \times 1024$  і вище співвідношення сигнал/шум для отриманих піків практично не змінюється.

В табл. 1 наведені пораховані за формулою (1) значення СПШ для усіх піків дев'ятифрагментної трансформованої ФМ (рис. 2,а) при декількох ефективних фокусних віддальях. В табл. 2 наведені також пораховані за формулою (1) значення СПШ для усіх піків трифрагментної трансформованої ФМ (рис. 2,б) при декількох ефективних фокусних віддальях. Розрахунок СПШ здійснювався для кожного піка і оточуючого його шуму в межах околу з розмірністю 11×11 піксель.

Таблиця 1

СПШ для піків від дев'ятифрагментної трансформованої ФМ

Ефективна фокусна віддаль (мм)	500	600	620	700	800
Номер піка	СПШ	СПШ	СПШ	СПШ	СПШ
1	13.3	17.3	20.2	15.8	19.3
2	17.5	23.4	25.7	23.7	22.0
3	8.2	18.8	11.6	17.5	17.6
4	25.9	24.5	22.0	22.4	11.5
5	10.2	12.1	12.5	12.4	14.1
6	14.9	20.5	20.0	20.5	12.5
7	13.7	20.0	11.4	14.5	8.9
8	13.6	12.1	15.4	14.2	9.3
9	13.3	14.1	14.3	12.1	15.9

Наведені в табл. 1 і в табл. 2 результати показують, що для різних ефективних фокусних віддалей  $f_e$  (від 500 до 800 мм для дев'ятифрагментної маски та від 300 до 700 мм для трифрагментної маски), а отже і для різних масштабів СЕС, значення СПШ суттєво не змінюються в даному діапазоні  $f_e$ . Проте, за нашими припущеннями СПШ повинно було б зростати при збільшенні  $f_e$ . Дійсно, якщо розміри СЕС зростають, то кількість пікселів ПЗЗ-матриці на один і той же просторовий період зареєстрованої інтерференційної картини збільшується, внаслідок чого достовірність відтворення кожного кореляційного піка у вихідному кореляційному сигналі повинна зростати. Справедливість такого твердження є цілком очевидною з точки зору теореми відліків [10] для фазових бінарних зображень з необмеженим спектром просторових частот, зокрема для фазових і трансформованих фазових масок, оскільки енергія СЕС від такого типу зображень монотонно зростає зі зростанням смуги пропускання цього спектру. Внаслідок цього високочастотні паразитні складові спектру в кореляційний сигнал зменшуються, що призводить до підвищення співвідношення СПШ. Однак таке твердження є справедливим лише тоді, коли зі зростанням розмірів СЕС пропорційно зростають розміри ПЗЗ-матриці за рахунок збільшення кількості пікселів матриці, розміри яких зберігаються незмінними. Якщо ж масштаб СЕС зростає, а розміри апертури ПЗЗ-матриці залишаються без змін, то значення СПШ, навпаки, можуть і спадати внаслідок зменшення відносної апертури зчитування зареєстрованої інтерференційної картини СЕС. Тобто, два фактори впливають на значення СПШ на виході гібридного корелятора СПФ: перший фактор, викликаний збільшенням кількості пікселів ПЗЗ-матриці на період, сприяє підвищенню СПШ, а другий фактор, викликаний зменшенням відносної апертури зчитування інтерференційної картини СЕС, сприяє підвищенню рівня шумів та завад і, як наслідок, зменшенню СПШ. Таку тенденцію, зокрема можна спостерігати для піків 2,6 і 8 від дев'ятифрагментної маски (табл. 1) і для

піка 2 від трифрагментної маски (табл. 2). Для інших піків ця тенденція простежується лише фрагментарно, що можна пояснити значним впливом оптичних шумів, зокрема інтермодуляційних шумів від вхідних зображень фазових масок та спекл-шумів.

Таблиця 2

**СПШ для піків від трифрагментної трансформованої ФМ**

Ефективна фокусна віддаль (мм)	300	400	500	600	700
Номер піка	СПШ	СПШ	СПШ	СПШ	СПШ
1	10.7	10.9	20.6	31.4	34.1
2	19.8	20.7	40.5	23.8	18.2
3	-	35.2	16.3	16.1	28.9

Таблиця 3

**СПШ для піків від трифрагментної трансформованої ФМ з різними апертурами зчитуючої ПЗЗ-матриці ( $f_e = 600$  мм)**

Діаметр апертури (мм)		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
		СПШ	СПШ	СПШ	СПШ	СПШ	СПШ
Номер піка	1	-	18.2	22.6	27.1	27.6	26.7
	2	-	18.1	20.7	27.1	30.8	37.1
	3	15.9	-	14.3	18.4	31.9	35.6

**Оцінка впливу обмеження апертури СЕС на кореляційні піки.** Для перевірки припущення про зменшення СПШ, викликане зменшенням відносної апертури зчитування зареєстрованого СЕС, були проведені вимірювання СПШ для різних апертур ПЗЗ-матриці при тій же самій ефективній фокусній віддалі когерентно-оптичного фур'є-процесора. Вимірювання проводились на експериментальному макеті гібридного корелятора СПФ з еквівалентною фокусною віддалю оптичного процесора  $f_e = 600$  мм. Під час вимірювань п'ять круглих апертур з діаметрами від 1 до 4 мм послідовно вводились в фур'є-процесор і фіксувались безпосередньо перед ПЗЗ-матрицею. Результати вимірювань СПШ наведені в табл. 3 і вказують на те, що зі зростанням розмірів апертури ПЗЗ-матриці СПШ монотонно зростає, що свідчить про вірність вказаного припущення. Розрахунок СПШ здійснювався для кожного піка і оточуючого його шуму в межах околу з розмірністю  $11 \times 11$  піксель.

**Висновки.** Проведені дослідження по розробці та оптимізації ОЦС, призначеної для ідентифікації ФМ, показали принципову можливість створення на основі такого типу систем малогабаритних, завадостійких та надійних приладів оптичного захисту документів та інших об'єктів. Однак порівняно низька швидкодія реалізації алгоритму ШПФ у такій системі суттєво зменшує її ефективність. Тому прилади такого типу мають містити такий спеціалізований цифровий фур'є-процесор, в якому час зворотнього дискретного фур'є-перетворення цифрового масиву з розмірністю  $512 \times 512$  піксель був би сумірний з часом формування цього масиву в ОЦС.

1. Horner J.L., Javidi B. *Optical security* // *Opt. Eng.* - 1996. - Vol. 36, N 9. - P. 2451-2452.
2. Javidi B., Horner J.L. *Optical pattern recognition for validation and security verification* // *Opt. Eng.* - 1994. - Vol. 33, N 6. - P. 1752-1756.
3. Патент України № 23353 А. Спосіб оптичного захисту та автоматичної ідентифікації документів та інших об'єктів / Л.І. Муравський,

В.М. Фітьо, М.В. Шовгенюк, М.П. Козловський, П.А. Глушак. - Публ. 31.08.98, Бюл.№ 4. 4. Патент України № 23888 А. Спосіб оптичного захисту та ідентифікації документів і інших об'єктів / Л.І. Муравський, В.М. Фітьо, М.В. Шовгенюк, М.П. Козловський. - Публ. 31.08.98, Бюл.№ 4. 5. Separation of random phase mask in optical correlator for security verification/ L.I. Muravsky, V.M. Fitio, M.V. Shovgenyuk, P.A. Hlushak // Proc. SPIE. Algorithms, Devices, and Systems for Optical Information Processing. - 1998. - Vol. 3466. - P. 267-277. 6. Transformed phase mask and photoanisotropic material in optical correlators applied for security verification/ L.I. Muravsky, T.I. Voronyak, V.M. Fitio, M.V. Shovgenyuk // Opt. Eng. - 1999. - Vol. 38, N 1. - P. 25-32. 7. Javidi B., Zhang G., Li J. Experimental demonstration of the random phase encoding technique for image encryption and security verification// Opt. Eng. - 1996. - Vol. 35, N 9. - P. 2506-2512. 8. Optical recognition of phase-encrypted biometrics / Johnson E.G., Brasher J.D. Gregory D.A. et al. // Opt. Eng. - 1998. - Vol. 37, N 1. - P. 18-26. 9. Lu G., Yu F.T.S. Performance of a phase-transformed input joint transform correlator // Appl. Opt. - 1996. - Vol. 35, N 2. - P. 304-313. 10. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. - М., 1970. 11. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. - М., 1985.

УДК 681.31 : 621.3.087.92

Паньків Р.С.

ДУ “Львівська політехніка”, НДКІ ЕЛВІТ

## ПРОЦЕСОР УПРАВЛІННЯ ЦИФРО–АНАЛОГОВИМИ ТА АНАЛОГО–ЦИФРОВИМИ ПЕРЕТВОРЕННЯМИ

©Паньків Р. С., 2000

**Розглянуті особливості архітектури процесорних пристроїв, що містять вузли цифро–аналогового та аналого–цифрового перетворення, показані обмеження та проблеми, що виникають при використанні для їх реалізації існуючих мікропроцесорів та мікро–ЕОМ. Запропонована концепція побудови і функціонування спеціалізованого процесора, що містить технічні засоби для апаратної і програмної підтримки цифро–аналогових та аналого–цифрових перетворювачів.**

Характерна ознака сучасних вимірювальних засобів і промислового обладнання, що використовується для контролю і управління технологічними процесами, – використання обчислювальних засобів, які містять не тільки окремі арифметичні вузли, алгоритм функціонування яких жорстко заданий, а мають розвинуте апаратне забезпечення, конфігурація та режим функціонування якого задається гнучко, програмним чином [1]. Тобто для забезпечення високих сервісних можливостей та повного використання останніх наукових досліджень та розробок сучасне вимірювальне та технологічне обладнання розробляється на основі процесорів.

Внаслідок бурхливого розвитку технології виготовлення інтегральних схем сьогодні доступні різноманітні мікропроцесори та однокристалні мікро–ЕОМ, внутрішня архітектура яких може відрізнятися окремими схемними рішеннями і наявністю деяких функціональних вузлів (помножувач, послідовний порт тощо), але всі вони не мають технічних засобів, що дозволяють враховувати особливості реалізації вузлів цифро–