

Т. Б. Мартинюк¹
Л. В. Крупельницький¹
М. В. Микитюк¹
М. О. Зайцев¹

ОСОБЛИВОСТІ БЛОКА КЕРУВАННЯ ДЛЯ КОРЕЛЯЦІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

¹Вінницький національний технічний університет

Широке запровадження мобільних роботів у різних сферах діяльності людини потребує подальшого їх вдосконалення та модернізації базових систем у їх складі. Найширше задіяні у цьому випадку засоби технічного зору у складі бортових систем мобільних роботів, а також пов'язані з ними блоки керування. Під час функціонування мобільного робота в автоматичному режимі необхідно врахувати низку особливостей та обмежень, зумовлених характером виконуваних практичних задач. Для блока керування насамперед — це забезпечення швидкодії спрацювання та компактності реалізації з орієнтацією на технології ПЛІС. У роботі ці аспекти побудови блока керування розглянуто з погляду реалізації кореляційної обробки статичних цифрових (бінарних) зображень. Як конкретний приклад вибрано оптоелектронну систему з кореляційною бінарною матрицею та матрицею світлодіодів для візуалізації сформованого оптичного кореляційного рельєфу. Такі системи найчастіше входять до складу бортових систем керування мобільних роботів і призначені для виявлення та ідентифікації об'єктів. Запропоновано структуру блока керування з урахуванням особливостей кореляційного оброблення в оптоелектронній системі. Блок керування містить три лічильника: лічильник тактів, лічильник адреси для зчитування з пам'яті еталонів, лічильник адреси для зсуву у кореляційній матриці, а також пристрій керування. Побудовано пристрій керування у складі блока керування як мікропрограми автомат (МПА) з використанням особливостей синтезу R-автомата. Особливістю R-автомата є реалізація його запам'ятовувальної частини на зсувному регістрі (R) на відміну від паралельних регістрів (T) та лічильників (CT). Такий підхід дозволяє спростити комбінаційну частину МПА з можливістю нарощування його регулярної запам'ятовувальної частини на базі зсувного регістра. Це дозволяє ефективно реалізувати такі структури в одній мікросхемі ПЛІС архітектури FPGA.

Ключові слова: блок керування, мікропрограми автомат, автомат Мура, R-автомат.

Вступ та постановка задачі

Процедура зіставлення з еталоном, що є базовою для кореляційного оброблення сигналів та зображень [1], [2], посідає основне місце серед відомих методів виявлення та вимірювання координат статичних та динамічних об'єктів [3]. Ці методи найзатребуваніші у системах автоматичного виявлення та супроводження рухомих об'єктів, які входять до складу бортових систем мобільних роботів [3]—[5].

Актуальність тематики пов'язана з тим, що важливою складовою засобів технічного зору у складі бортових систем мобільних роботів різного призначення є пристрої кореляційного оброблення зображення рухомих та нерухомих об'єктів [4], [5]. Необхідність обробки та аналізу зображень в реальному часі, а також забезпечення роботи для мобільного робота в автономному режимі потребують врахування особливостей та обмежень, що зумовлюються характером практичних задач [4]. Не в останню чергу низка обмежень накладається відповідно і на структуру та принцип функціонування блока керування у складі бортових систем мобільних роботів.

Метою роботи є зменшення апаратних витрат під час реалізації блока керування для кореляційного оброблення цифрових зображень для мобільних роботів з орієнтацією на технології ПЛІС.

Як об'єкт дослідження вибрано варіант реалізації кореляційної обробки статичних зображень в оптоелектронній системі з кореляційною матрицею та матрицею світлодіодів [6], [7]. Такі системи найчастіше входять до складу бортових систем керування мобільних роботів і призначені для виявлення та ідентифікації об'єктів [3], [4], [8].

У вибраній оптоелектронній системі аналізу зображень [7] реалізовано функціональне розподілення процесу нормалізованого кореляційного оброблення бінарних зображень [9]:

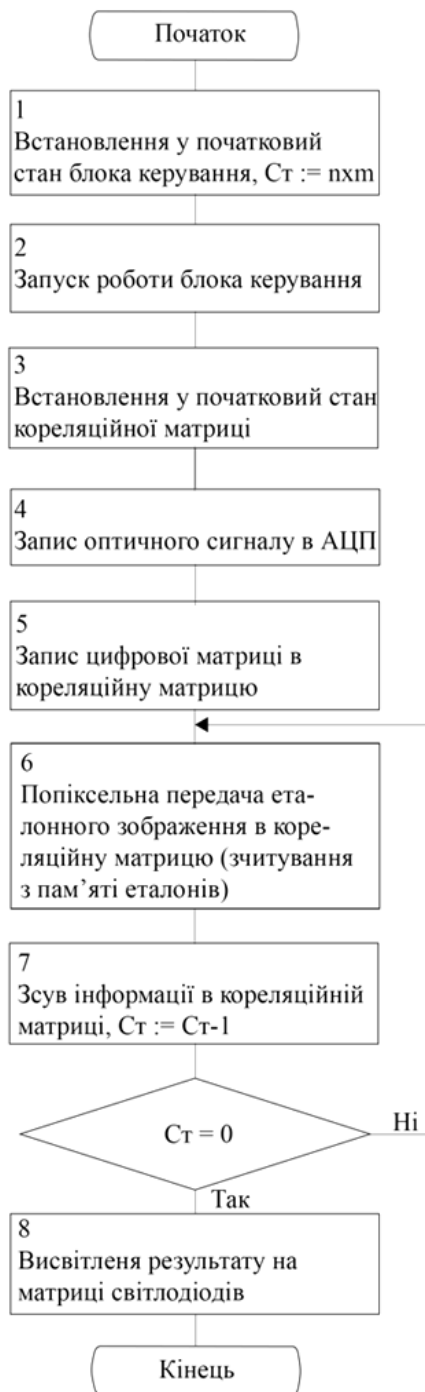


Рис. 1. Блок-схема алгоритму кореляційного оброблення

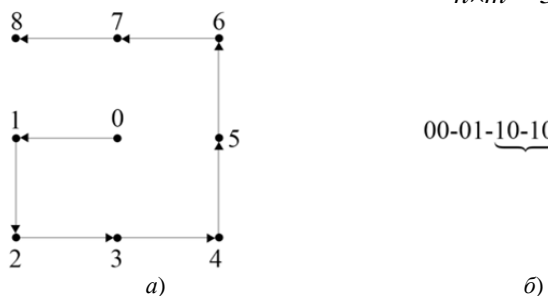


Рис. 2: а — розгортка поточного зображення; б — формування адреси

безпосередню обробку виконує кореляційна матриця із задіянням пам'яті еталонів, введення та аналого-цифрове перетворення оптичного зображення виконує АЦП, а виведення сформованої матриці кореляційних коефіцієнтів реалізує матриця світлодіодів з формуванням оптичного кореляційного рельєфу.

На рис. 1 показано блок-схему алгоритму кореляційного оброблення у вибраній оптоелектронній системі. Таким чином, функціонально блок керування реалізує початкові операції: оператори 3, 5, а також цикл кореляційного оброблення: оператори 6, 7. До початку кореляційного оброблення необхідно записати у пам'ять еталонів масив сформованих еталонів зображення у вигляді двійкових кодів розмірністю $n \times m$ бітів, враховуючи їх розгортку. Отже, у лічильнику тактів, який входить до складу блока керування, необхідно зафіксувати відповідно величину $n \times m$ (оператор 1).

Поза тим, необхідно блоком керування сформувати відповідну адресу в процесі попіксельного (порозрядного) зчитування еталонного зображення (оператор 6), а також відповідну адресу для зсуву інформації у кореляційній матриці з урахуванням прийнятої розгортки еталонного зображення (оператор 7). Таким чином, під час побудови блока керування необхідно врахувати всі особливості функціонування оптоелектронної системи [7].

Структура блока керування

Враховуючи вищенаведені особливості роботи блока керування для оптоелектронної системи, до його складу необхідно ввести три лічильники: лічильник тактів, лічильник адреси для зчитування з пам'яті еталонів і лічильник адреси для зсуву в кореляційній матриці, а також пристрій керування як мікропрограмний автомат (МПА).

Лічильник адреси для зчитування з пам'яті еталонів представляє собою двійково-десятковий лічильник, що працює у режимі прямої лічби. У двійково-десятковому лічильнику тактів на початку роботи фіксується розмірність $n \times m$ еталонного зображення ЕЗ, яка визначає тривалість циклу кореляційної обробки. Він працює у режимі зворотної лічби.

Лічильник адреси для зсуву у кореляційній матриці задіяний для формування напрямку зсуву поточного зображення ПЗ у кореляційній матриці. Він працює у режимі прямої лічби.

На рис. 2а показано розгортку ПЗ від центрального пікселя за спіраллю з урахуванням розмірності конкретного ЕЗ $n \times m = 3 \times 3$ і кількості тактів від 0 до 8, як показано у роботах [7], [9]. Відповідно на рис. 2б показано послідовність формування адреси для зсуву ПЗ у кореляційній матриці, починаючи від стану (00). Тут враховано подвійне виконання зсуву у трьох напрямках.

Кодування напрямку зсуву ПЗ з врахуванням його послідовності для прикладу, що наведений у роботі, [7], подано у табл. 1.

Синтез мікропрограмного автомата

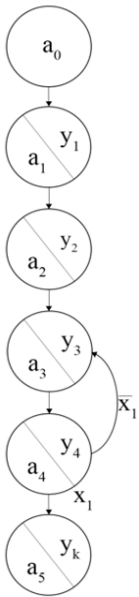


Рис. 3. Автомат Мура

В процесі абстрактного синтезу МПА вибрано автомат Мура [10] через можливість безпосереднього формування сигналів керування, які співвідносяться з операторними вершинами граф-схеми алгоритму (ГСА) (рис. 3). Враховуючи простоту (лінійність) ГСА, МПА доцільно реалізувати на R-автоматі (RA), використовуючи відому методику синтезу пристроїв керування на RA [11]—[13]. Це обумовлено, по-перше, незначною кількістю операторних та умовних вершин ГСА, а по-друге, наявністю домінуючого лінійного ланцюга λ , що містить операторні вершини $a_1 - a_4$, і тільки два умовних переходи (рис. 3).

Таким чином, розрядність N зсувного регістра, який є запам'ятовувальною частиною МПА, дорівнює $N = 5$, що відповідає кількості операторних вершин ГСА.

У табл. 2 подано пряму структурну таблицю (ПСТ), що дозволяє сформулювати спрощену таблицю нелінійних переходів (табл. 3), які не входять до лінійного ланцюга λ . Ці нелінійні переходи реалізуються комбінаційною схемою МПА, оскільки лінійні переходи, зі свого боку, реалізуються в процесі прямого зсуву одиничного позиційного коду 10000-00010 від 1-го розряду D1 зсувного регістра до його 4-го розряду D4.

Таблиця 1

Напрямок зсуву	Код двійковий
Початковий стан	0 0
Зсув ліворуч	0 0
Зсув донизу	0 1
Зсув праворуч	1 0
Зсув догори	1 1

Таблиця 2

Пряма структурна таблиця для RA

Початковий стан a_m	Код початкового стану $K(a_m)$	Стан переходу a_s	Код переходу $K(a_s)$	Вхідний сигнал $X(a_m, a_s)$	Вихідний сигнал $Y(a_m, a_s)$	Функція збудження $\Phi(a_m, a_s)$	Ознака належності $(a_m, a_s) \in \lambda$	Номер переходу h
a_0	0 0 0 0 0	a_1	1 0 0 0 0	1	y_1	D_1	+	1
a_1	1 0 0 0 0	a_2	0 1 0 0 0	1	y_2	D_2	+	2
a_2	0 1 0 0 0	a_3	0 0 1 0 0	1	y_3	D_3	+	3
a_3	0 0 1 0 0	a_4	0 0 0 1 0	1	y_4	D_4	+	4
a_4	0 0 0 1 0	a_3	0 0 1 0 0	\bar{x}_1	y_3	$D_3\bar{D}_4$	—	5
		a_5	0 0 0 0 1	x_1	y_k	$D_5\bar{D}_4$	—	6

Отже, для реалізації МПА обрано керуючий автомат з «жорсткою» логікою, коли функції нелінійних переходів подаються системою булевих рівнянь на відміну від МПА, наприклад, з операційним автоматом переходів [14], [15].

Таблиця 3

Спрощена ПСТ для RA

Початковий стан a_m	Код початкового стану $K(a_m)$	Стан переходу a_s	Код переходу $K(a_s)$	Вхідний сигнал $X(a_m, a_s)$	Вихідний сигнал $Y(a_m, a_s)$	Функція збудження $\Phi(a_m, a_s)$	Номер переходу h
a_4	0 0 0 1 0	a_3	0 0 1 0 0	\bar{x}_1	y_3	$D_3\bar{D}_4$	5
		a_5	0 0 0 0 1	x_1	y_k	$D_5\bar{D}_4$	6

Два нелінійних переходи, що наведені у табл. 3, свідчать про нескладну логічну схему, що є перевагою реалізації МПА на RA, оскільки відомо, що логічна схема МПА традиційно характеризується високою швидкодією, але й значними апаратними витратами [15].

Структура мікропрограмного автомата

За даними табл. 2 і 3 синтезовано функціональну схему МПА (рис. 4), де використано такі позначення: Set — настановний одиничний сигнал, S0, S1 — входи вибору режиму зсувного регістра RG, Reset — сигнал скидання, Clock — тактові імпульси, Y_k — сигнал завершення.

У разі комбінації рівнів сигналів відповідно на входах S0, S1 вибору режиму «високий, низький» виконується зсув інформації праворуч у зсувному регістрі RG, а у разі комбінації «обидва високі» відбувається паралельне завантаження з його входів D1—D5 [16], що відповідає примусовому встановленню нового стану та обнуленню поточного стану регістра RG.

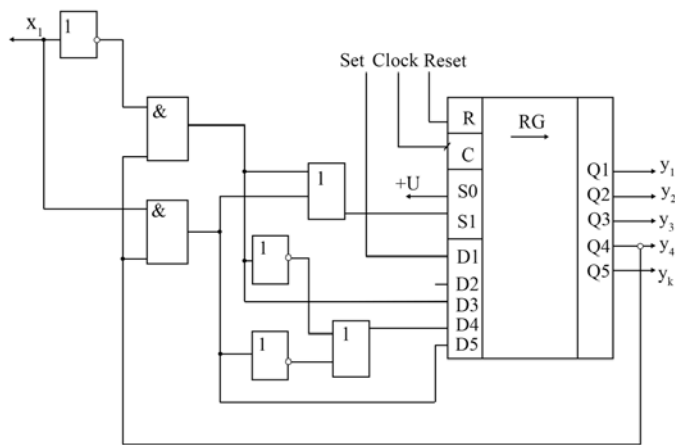


Рис. 4. Функціональна схема МПА

ПЛІС, забезпечуючи оптимізацію за апаратними витратами та за швидкодією.

У наведеному прикладі реалізовано один з відомих принципів ефективного синтезу МПА [20]: зменшення частки складного логічного перетворювача за рахунок збільшення частки регулярної за структурою запам'ятовувальної частини МПА, а саме зсувного регістра. А це, зі свого боку, відповідає теоретичній концепції однорідних обчислювальних середовищ, що ефективно реалізуються у ПЛІС з можливістю нарощування регулярних складових [20].

Висновки

1. Наведений приклад побудови МПА за конкретною ГСА для блока керування свідчить про ефективність застосування методики синтезу на базі R-автомата. Це пов'язано зі спрощенням комбінаційної частини МПА, що зі свого боку, залежить від довжини лінійної частини ГСА.

2. Показано, що кількість операторних вершин ГСА впливає тільки на розрядність зсувного регістра, який є запам'ятовувальною частиною МПА, що не становить труднощів у разі нарощування її розрядності через регулярність структури зсувного регістра.

3. Використання одиничного позиційного коду дозволяє відмовитись від складної процедури кодування станів, що впливає на формування функцій переходу у комбінаційній частині МПА. В результаті лінійні переходи між станами ГСА реалізуються в процесі послідовного зсуву одиничного позиційного коду у розрядах зсувного регістра, а нелінійні переходи — в процесі примусового встановлення відповідного стану у його розрядах.

4. Запропонований МПА є відносно регулярною структурою за рахунок використання таких стандартних базових елементів, як лічильники і зсувний регістр, а комбінаційна частина МПА має спрощений вигляд. Це дозволяє ефективно реалізувати такі структури у мікросхемі ПЛІС, що, зі свого боку, дозволяє досягти прийнятної швидкодії спрацювання та компактної реалізації блока керування у складі бортових систем мобільних роботів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] У. Прэтт, *Цифровая обработка изображений*, кн. 2. Москва: Мир, 1982.
- [2] В. Н. Бондарев, Г. Трестер, и В. С. Чернега, *Цифровая обработка сигналов*. Харьков, Украина: Конус, 2001.
- [3] Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, О. Е. Балашов, и А. И. Степашкин, *Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление*. Москва, Россия: Радиотехника, 2008.
- [4] Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, Л. Н. Костяшкин, и Ю. Н. Романов, «Обработка и анализ изображений в бортовых оптико-электронных системах», *Труды науч.-техн. конф.-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами - 2010»*. Москва, Россия: КДУ, 2011.
- [5] А. В. Гаврилов, В. В. Губарев, К. Х. Джо, и Х. Х. Ли, «Архитектура гибридной интеллектуальной системы управления мобильного робота», *Вестник Новосибирского ГТУ*, № 2, с. 3-13, 2014.
- [6] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, М. Г. Тарновський, і Д. О. Шаромов, «Реалізаційні моделі оптоелектронного корелятора», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2 (39), с. 53-59, 2017.
- [7] Т. Б. Мартинюк, С. В. Богомолов, С. М. Фащілін, і Е. С. Генеральницький, «Аналіз зображень в оптоелектронній системі з кореляційною матрицею», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (43), с. 39-46, 2019.
- [8] Ф. Жимарши, *Сборка и программирование мобильных роботов в домашних условиях*. Москва, Россия: ИТ Пресс, 2007.
- [9] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, І. Ю. Видмиш, і Д. О. Шаромов, «Нормалізована кореляційна обробка двовимірних зображень», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (37), с. 44-50, 2016.
- [10] А. А. Баркалов, «Оптимизация логической схемы автомата Мура на программируемых БИС», *Управляющие системы и машины*, № 6, с. 38-41, 2001.
- [11] В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартинюк, и К. В. Кожемяко, «Синтез устройств управления на R-автомате», *Управляющие системы и машины*, № 1/2, с. 22-25, 1995.

- [12] Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, і Н. В. Фофанова, «Два варіанти синтезу мікропрограмних R-автоматів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 47-53, 1998.
- [13] В. П. Кожем'яко, Т. Б. Мартинюк, Н. В. Фофанова, і В. В. Дмитрук, «Порівняльний аналіз варіантів синтезу мікропрограмних автоматів», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, № 1 (9), с. 225-233, 2005.
- [14] А. А. Баркалов, і Р. М. Бабаков, «Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах», *Кибернетика и системный анализ*, № 2, с. 21-26, 2011.
- [15] Р. М. Бабаков, «Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, с. 35-41, 2017.
- [16] В. Л. Шило, *Популярные цифровые схемы*, справ. 2-е изд. Челябинск: Металлургия, 1989.
- [17] В. В. Соловьев, Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. Москва, Россия: Горячая линия – Телеком, 2001.
- [18] В. Соловьев, і А. Климович, «Использование входных буферов ПЛИС в качестве элементов памяти конечных автоматов», *Chip News*, № 2 (22), с. 24-28, 2003.
- [19] В. Б. Стешенко, *ПЛИС фирмы «Altera»: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры*. Москва, Россия: Издательский дом «Додэка – XXI», 2002.
- [20] С. М. Ачасова, *Алгоритмы синтеза автоматов на программируемых матрицах*. Москва: Радио и связь, 1987.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.11.2021

Мартинюк Тетяна Борисівна — д-р техн. наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com ;

Крупельницький Леонід Віталійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки, e-mail: krupost@gmail.com ;

Микитюк Максим Васильович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: maksym.mykytiuk@gmail.com ;

Зайцев Микола Олександрович — аспірант кафедри обчислювальної техніки, e-mail: mrmikolayzv@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

T. B. Martyniuk¹
L. V. Krupelnytskyi¹
M. V. Mykytiuk¹
M. O. Zaitsev¹

Features of the Control Block for Correlation Image Processing

¹Vinnitsia National Technical University

The widespread introduction of mobile robots in various areas of human activity requires their further improvement and modernization of basic systems in their composition. The most involved in this case are the means of technical vision in the onboard systems of mobile robots, as well as the associated control blocks. When the mobile robot functions in automatic mode, it is necessary to take into account several features and limitations that are due to the nature of the practical tasks. For the control block, first of all, it is to ensure the speed of operation and compactness of implementation with a focus on FPGA technology. In this paper, these aspects of the construction of the control block are considered in terms of the implementation of correlation processing of static digital (binary) images. As a specific example, an optoelectronic system with a correlation binary matrix and a matrix of LEDs to visualize the generated optical correlation relief was chosen. Such systems are most often part of onboard control systems for mobile robots and are designed to detect and identify objects. The structure of the control block is proposed, taking into account the peculiarities of correlation processing in the optoelectronic system. The control block contains three counters: a clock counter, an address counter for reading from the reference memory, an address counter for an offset in the correlation matrix, and a control device. The control device as a part of the control block as the microprogram automaton (MPA) with the use of features of synthesis of the R- automaton is constructed. A feature of the R-machine is the implementation of its storage part on the shift register (R) in contrast to the parallel registers (T) and counters (ST). Such an approach simplifies the combinational part of the MPA with the possibility of increasing its regular memory based on the shift register. This allows you to effectively implement such structures in a single chip with FPGA architecture.

Keywords: control block, microprogram automaton, Moore automaton, R-automaton.

Martyniuk Tetiana B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com ;

Krupelnytskyi Leonid V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Engineering, e-mail: krupost@gmail.com ;

Mykytiuk Maksym V. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Engineering, e-mail: maksym.mykytiuk@gmail.com ;

Zaitsev Mykola O. — Post-Graduate Student of the Chair of Computer Engineering, e-mail: mrmikolayzv@gmail.com