

МЕТОД КОРЕЛЯЦІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДАНИХ, СТРУКТУРА ТА КОМПОНЕНТИ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ КОРЕЛЯТОРІВ У БАЗИСІ ХААРА–КРЕСТЕНСОНА

© Албанський І.Б., 2012

Запропоновано методи кореляційного опрацювання даних на основі кореляційних функцій у різних теоретико-числових базисах. Подано структурну блок-схему швидкодіючого корелятора у базисі Хаара–Крестенсона.

Ключові слова: корелятор, теоретико-числовий базис, базис Хаара–Крестенсона, кореляційний спецпроцесор, кореляційні функції.

Proposes a method of correlation data processing based on correlation functions in different theoretical-numerical bases. The presented structural block diagram fast-acting correlator in the basis of the Haar-Krestenson.

Key words: correlator, theoretical-numerical basis, base Haar-Krestenson, correlation special processor, correlation functions.

Вступ

Сьогодні проблема кореляційного опрацювання інформаційних потоків та вдосконалення структур високопродуктивних кореляторів набуває все більшої актуальності. Враховуючи сучасний стан розвитку процесорної обчислювальної техніки та технологій реалізації платформних основ на програмовано-логічних матрицях (ПЛМ) і мікроконтролерних засобів, можна зробити висновок про різке збільшення можливостей щодо практичної реалізації спецпроцесорів кореляційного опрацювання даних на основі різних теоретико-числових базисів (ТЧБ). Спецпроцесори кореляційного опрацювання сигналів та цифрових потоків даних широко застосовуються як перетворювачі потоків інформації, аналізатори, фільтри та цифрові приймачі у модемах телекомунікаційних комп'ютерних систем.

Огляд літературних джерел

Традиційно методи та способи кореляційного опрацювання даних виконуються на основі мультиплікативних функцій коваріації, кореляції та застосування теоретико-числового базису Радемахера [1]. Це призвело до суттєвого обмеження можливостей побудови високопродуктивних кореляційних спецпроцесорів (КСП), в яких комплексно використовуються переваги різних ТЧБ при реалізації їх компонентів. Основне завдання, яке вирішували спецпроцесори названого призначення, полягало у зменшенні обсягів даних і характеристик досліджуваних випадкових процесів. Ця інформаційна технологія полягала в тому, що замість передавання великих масивів даних $\{x_i\}$, $i \in 1, n$, де n – об'єм вибірки $0 \leq x_i \leq 2^k$, k – розрядність бортового АЦП, передавався масив даних, як правило, знаковою автокореляційною моделлю [1]. Аналітика та асимптотика такої кореляційної функції, яка подана у вигляді нормованої та центрованої моделі, дає змогу отримати дані без додаткових перетворень використовувати для розрахунку спектрів у різних теоретико-числових базисах, а також застосовується в задачах розпізнавання образів на основі аудіовідеосигналів. Світова практика реалізації кореляційного аналізу базується на обчисленні близько десяти різних аналітичних функцій таких типів: знакової, релейної, коваріаційної, кореляційної, структур-

ної, модульної, еквівалентності та деяких інших модифікацій [2]. Отже, використання найпоширеніших теоретико-числових базисів – унітарного, Хаара, Радемахера, Крестенсона та Галуа для побудови спецпроцесорів кореляційного опрацювання сигналів на основі названих кореляційних функцій приводить до приблизно сорока різних архітектур кореляційних спецпроцесорів (КСП), системні характеристики та реалізація компонентів яких недостатньо досліджені й не відображені у спеціалізованих джерелах. Тому дослідження наявних та розроблення нових ефективних методів побудови проблемно-орієнтованих КСП для різних сфер застосування в інформаційних системах є актуальним науково-технічним завданням. При цьому реалізація компонентів структурних схем КСП може виконуватися в різних ТЧБ з метою досягнення системних характеристик, що задовольняють мінімаксні критерії структурної, апаратної, часової, алгоритмічної та програмної складностей.

У створення та розвиток теорії кореляційного аналізу сигналів на основі різних кореляційних функцій значний внесок зробили: А.Н. Колмогоров, Е.С. Вентцель, Ф.Г. Ланге, Е.І. Цветков, М.Г. Серебряніков, А.А. Первозванський, В.П. Тарасенко, Я.М. Николайчук [3–9].

Постановка задачі

Метою дослідження статті є систематизація методів опрацювання інформаційних потоків на основі аналітики різних кореляційних функцій та теоретико-числових базисів, розроблення структури та компонентів високопродуктивного цифрового корелятора в базисі Хаара–Крестенсона.

Результати досліджень

Аналіз використання теоретико-числового базису Радемахера та кодів двійкової системи числення під час створення цифрових кореляторів показує, що на сучасному етапі розвитку процесорних технологій практично вичерпані потенційні характеристики кодової системи базису Радемахера для створення кореляційних спецпроцесорів з максимальною швидкістю та мінімальною апаратною складністю. Тому ця проблема привела до обмежень, зумовлених наявністю наскрізних переносів у структурах матричних перемножувачів та накопичувальних суматорів в архітектурі цифрових кореляторів, що використовують кодову систему базису Радемахера. Сучасний розвиток базових платформ для реалізацій різномікроспроцесорних засобів уможливив реалізацію на ПЛМ компонентів кореляційних спецпроцесорів на основі одноканальних матричних операцій в кодових системах базисів Хаара, Крестенсона та Галуа, що визначає перспективи застосування названих кодових систем для створення та реалізації кореляційних спецпроцесорів.

Розроблення теорії та реалізація кореляційного опрацювання сигналів на основі решічастих функцій, які формуються на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП) в процесі перетворення аналогових сигналів на цифровий, удосконалили та розвинули відомі спеціалісти [10–12]. При цьому, як правило, не враховували ефектів, які змінюють інформаційні характеристики цифрових кореляторів порівняно з класичними аналоговими кореляційними функціями, що реалізовані у вигляді мультиплікативного інтеграла [3]:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int x(t) \cdot x(t + \tau) dt, \quad (1)$$

де τ – часовий зсув.

Систематизовано теоретичні засади аналітики та асимптотики розрахунку кореляційних функцій на основі різних дискретних інтегралів (табл. 1). В таблиці представлені сім аналітичних виразів для розрахунку кореляційних функцій, в яких використовуються знакові, центровані та нецентровані значення цифрових відліків, а також різні оцінки дискретних інтегралів (мультиплікативний, квадрат різниці, модульна різниця та еквівалентність).

Аналітика та асимптотика кореляційних функцій

№ з/п	Кореляційна Функція	Автокореляційна функція	Асимптотика
1	Знакова	$H_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overset{0}{\text{sign}}(x_i) \cdot \overset{0}{\text{sign}}(x_{i+j}) \cdot$	
2	Релейна	$B_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \overset{0}{\text{sign}}(x_{i+j}) \cdot$	
3	Коваріаційна	$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j} \cdot$	
4	Кореляційна	$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overset{0}{x_i} \cdot \overset{0}{x_{i+j}} \cdot$	
5	Структурна	$C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+j})^2 \cdot$	
6	Модульна	$G_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_{i+j} \cdot$	
7	Еквівалентності	$F_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overset{0}{Z}_{xx} \cdot$	

Перспективи розвитку теорії, методології та техніки процесорів комп'ютерних систем зумовлені теоретичним та ідейним насиченням можливостей застосування базису Радемахера для побудови арифметико-логічних компонентів процесорів, до яких ставлять все жорсткіші вимоги щодо швидкодії, удосконалення структури та розширення функціональних можливостей. На рис. 1 подано характеристики найвідоміших теоретико-числових базисів, які породжують системи числення, а саме об'єм кодової матриці і діапазон представлених чисел.

$$M_{Unit} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{Haar} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{Rad} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$n = \frac{N^2}{2}, V = N^2$$

a

$$n = N, V = N^2$$

б

$$n = \frac{N \cdot \log_2 N}{2}, V = N \log_2 N$$

в

$$M_{Cres} = \begin{pmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2 & 2 & \dots & 2 \\ 0 & 3 & \dots & 3 \\ 1 & 4 & \dots & 4 \\ 2 & 0 & \dots & 5 \\ 0 & 1 & \dots & 6 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n \end{pmatrix}$$

$$n = \prod_{i=1}^m P_i, V = \sum_{i=1}^m \log_2(P_i - 1)$$

г

$$M_{Gal} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$n = \frac{N}{2}, V = N$$

д

Рис. 1. Кодові матриці дискретних базисів та їх характеристики:

a – унітарний базис; б – базис Хаара; в – базис Радемахера; г – базис Крестенсона; д – базис Галуа

Важливою характеристикою кожного базису є кількість інформаційних елементів (n) та об'єм його кодової матриці (V), що визначає характеристики надлишковості представлення інформації.

На рис. 2 наведена діаграма надлишковості кодування даних у досліджуваних ТЧБ для прикладу з максимальною розрядністю N=8.

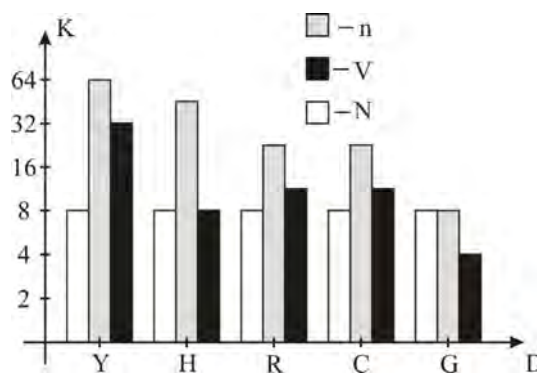


Рис. 2. Діаграма характеристик надлишковості ТЧБ:
Y – унітарний базис; H – базис Хаара; R – базис Радемахера;
C – базис Крестенсона; G – базис Галуа

Наведені в табл. 2 базиси характеризуються визначеним об'ємом кодової матриці для подання даних. При цьому найбільш надлишковим базисом є унітарний, в якого кодова матриця $V = N^2$, а кількість активних кодових елементів $n = N^2 / 2$, де N – діапазон кодування даних. Великою надлишковістю характеризується базис Хаара. Широко застосовуються для кодування

даних у сучасних комп'ютеризованих системах бази Радемахера та Крестенсона, в яких $V = N \log_2 N$. Ці бази відповідно породжують двійкову систему числення та систему числення залишкових класів.

Найменшу надлишковість кодування даних забезпечує базис Галуа, кодова матриця якого $V = N$, а $n = N/2$ [13].

Високих мінімаксних характеристик перетворень форми інформації можна досягти сумісним використанням різних ТЧБ, наприклад, Хаара–Крестенсона, Радемахера–Крестенсона, Крестенсона–Галуа.

Актуальним завданням розроблення спецпроцесорів кореляційного опрацювання інформаційних потоків є розроблення високопродуктивних структур, що визначається дискретною коваріаційною функцією згідно з виразом:

$$K_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{i+j}, \quad j \in \overline{0, \dots, M},$$

де n – об'єм вибірки; $[x_i]$ – одновимірний масив даних; M – кількість точок кореляційної функції.

Цифрові дані $[x_i]$ можуть квантуватися з різними діапазонами 2^K , де $K=2, 4, 8, \dots$ – розрядність АЦП.

Принцип методу кореляційного опрацювання цифрових даних у базисі Хаара–Крестенсона покладено в основу перетворення вхідного потоку даних з базису Крестенсона згідно з виразом:

$$X_i \begin{cases} \rightarrow \text{res } x_i \pmod{p_1} = b_1 \\ \dots \\ \rightarrow \text{res } x_i \pmod{p_j} = b_j \\ \dots \\ \rightarrow \text{res } x_i \pmod{p_K} = b_K \end{cases}$$

При цьому виконання операції множення $x_i \cdot x_{i+j}$ та підсумування отриманих добутоків виконується паралельно по кожному модулю згідно з виразами:

$$\begin{array}{r} \times \quad x_i = (b_1 \dots b_u \dots b_K) \\ \quad \quad x_{i+j} = (c_1 \dots c_u \dots c_K) \\ \hline x_i \cdot x_{i+j} = (d_1 \dots d_u \dots d_K) \end{array},$$

$$d_u \text{ res}(b_u \cdot c_u) \pmod{P_u}, \quad u \in \overline{1, K};$$

$$K_{xx}(j) = S_0 + S_1 + \dots + S_i + \dots + S_n;$$

$$S_0 = 0, \quad S_i = S_{i-1} + S_i, \quad S_{i-1} = (d_{i-1}, 1 \dots d_{i-1}, u \dots d_{i-1}, K), \quad S_i = (d_i, 1 \dots d_i, u \dots d_i, K)$$

$$S_i = (f_i, 1 \dots f_i, u \dots f_i, K), \quad \text{де } f_{i,0} = \text{res}(d_{i-1}, u + d_{iu}) \pmod{P}.$$

В основу роботи високопродуктивного автокорелятора покладено кодування та цифрове опрацювання цифрових значень вхідних сигналів у ТЧБ Хаара–Крестенсона. Тобто в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП) паралельного типу відсутній шифратор, який перетворює код на виході логічних елементів “виключаюче АБО” на двійковий код базису Радемахера. У матричному шифраторі Хаара-Крестенсона відбувається формування паралельних кодів Хаара залишків взаємопростих модулів системи залишкових класів базису Крестенсона [14]. Такий принцип кодування інформації в автокореляторі дає змогу виконувати модульні операції множення та підсумування за один такт у вентильних матрицях. Тобто запропоноване рішення забезпечує оцінку швидкодії автокорелятора згідно з виразом:

$$t_{\text{автокор.}} = t_{\text{АЦП}} + t_{\text{КМ}} + t_{\text{М}} + t_{\text{Р}} + t_{\Sigma} + t_{\text{Т}} + t_{\text{Н}},$$

де $t_{\text{АЦП}} = t_{\text{К}} + t_{\text{ЛЕ}}$; $t_{\text{К}} = 10u$ – тривалість перемикання компаратора; $t_{\text{ЛЕ}} = 1u$ – тривалість перемикання логічного елемента; $t_{\text{КМ}} = 1u$ – тривалість перемикання кодової матриці; $t_{\text{М}} = 1u$ – тривалість перемикання D-тригера пам'яті корелятора; $t_{\text{Р}} = 2u$ – тривалість перемикання вентильної матриці перемноження за модулем P ; $t_{\Sigma} = 2u$ – тривалість перемикання вентильної

матриці підсумування за модулем P_i ; $t_T = 1u$ – тривалість перемикання D-тригера регістра пам'яті накопичувального суматора; $t_H = 2u$ – тривалість перемикання вентиляльної матриці шифратора.

Отже, сумарний час перемикання автокорелятора у базисі Хаара–Крестенсона дорівнюватиме $t_{автокор.} = 20u$, тобто у 5–7 разів перевищує швидкодію відомого корелятора в базисі Радемахера. У табл. 2 наведено порівняльну характеристику швидкодії кореляторів у базисах Радемахера та Хаара–Крестенсона.

Таблиця 2

Характеристики швидкодії кореляторів

№	Оцінка швидкодії	Базис Радемахера	Базис Хаара–Крестенсона
1	$t_{АЦП}$	11u	11u
2	t_{KM}	-	1u
3	t_M	1u	1u
4	t_P	37u	2u
5	t_{Σ}	$2K + \log N$	2u
6	t_T	1u	1u
7	t_H	-	2u

Приклади розрахунку параметрів автокорелятора, структура якого подана на рис. 3, при різній розрядності АЦП K , кількості каналів автокорелятора M і об'ємі вибірки N :

– вихідні дані автокорелятора $K=4, M=16, N=256$. Шукаємо набір взаємопростих модулів (P_1, P_2, \dots, P_k), добуток яких найменше перевищує суму добутків максимальних значень $x_i \cdot x_{i-j}$, тобто

$$\prod_{i=1}^k P_i \geq \sum_{i=1}^{256} x_i \max \cdot x_{i-j} \max . \text{ Для нашого прикладу } x_i \max = 2^4 - 1 = 15, \text{ отже } \sum_{i=1}^{256} 15^2 = 57600 .$$

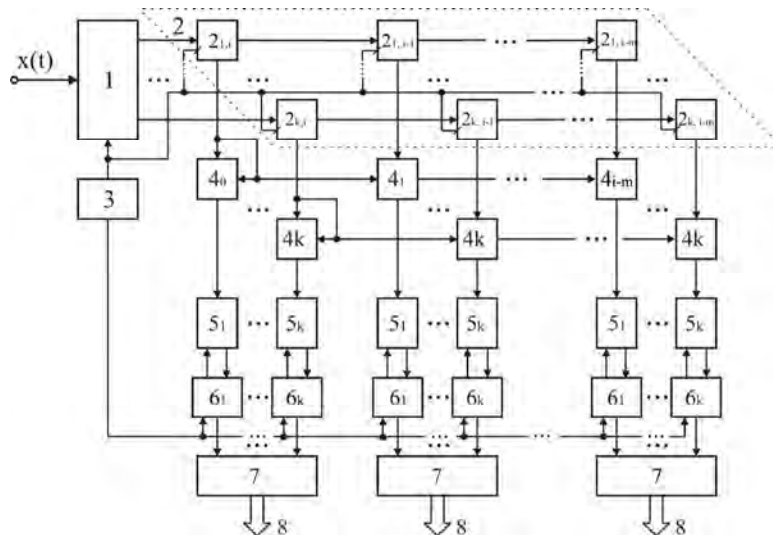


Рис. 3. Структура автокорелятора у базисі Хаара–Крестенсона:
 1 – АЦП паралельного типу з вихідним кодом базису Хаара; 2 – блок пам'яті;
 3 – генератор імпульсів; 4 – вентиляльні матриці перемноження за модулем;
 5 – вентиляльні матриці підсумування за модулем;
 6 – регістр пам'яті; 7 – шифратор

Вибираємо набір таких взаємопростих модулів: $p_1=11$, $p_2=13$, $p_3=15$, $p_4=31$. Їх добуток дорівнює $P=11 \cdot 13 \cdot 15 \cdot 31=66495$, що задовольняє діапазон кодування чисел у системі залишкових класів. Структура аналого-цифрового перетворювача для формування вихідних кодів Хаара-Крестенсона для вибраного набору модулів має вигляд, показаний на рис. 4.

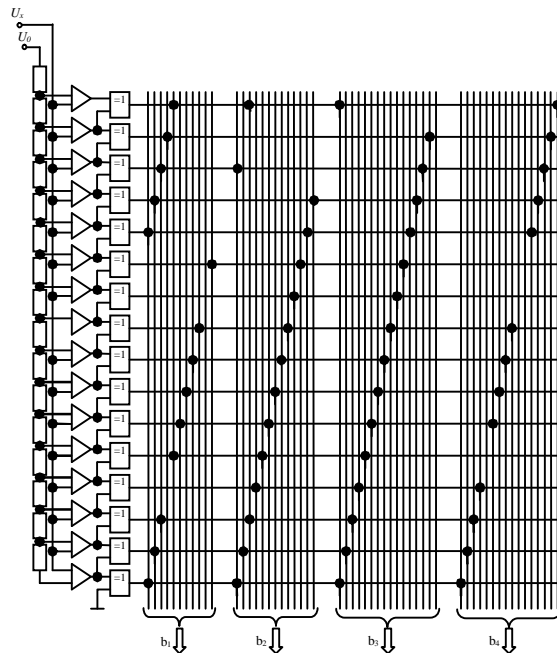


Рис. 4. Структура аналого-цифрового перетворювача з матричним шифратором для формування вихідних кодів Хаара-Крестенсона

На рис. 5, а показано структуру вентильної матриці перемноження за модулем 11, де точка перетину двох шин відповідає двоходовому логічному елементу “І-НЕ”, а на рис. 5, б – приклад вентильної матриці підсумування за модулем 11.

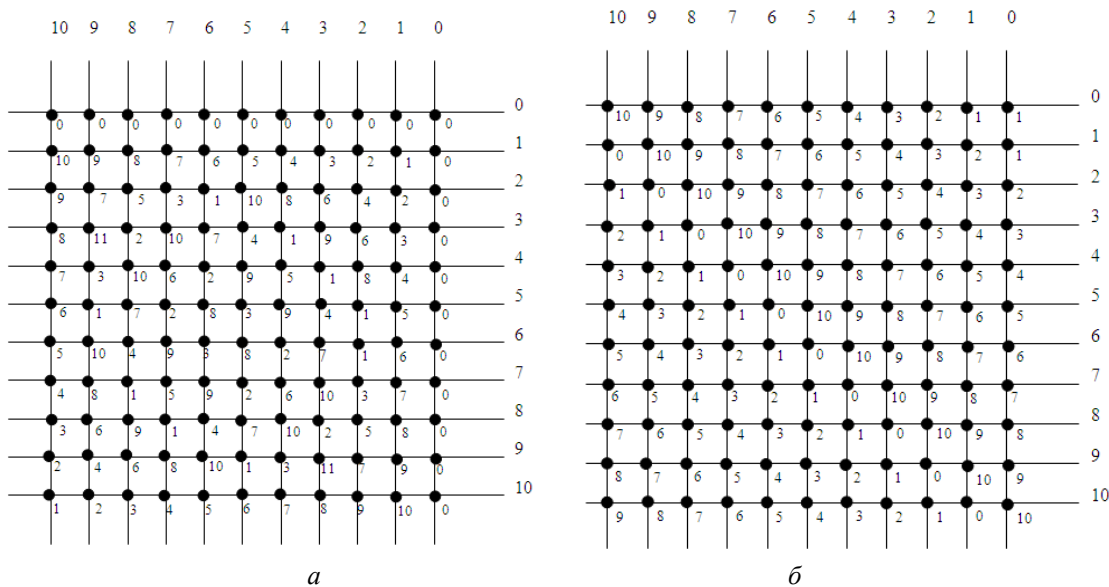


Рис. 5. Структура вентильних матриць перемноження (а) та підсумування (б) за модулем 11

– вихідні дані автокорелятора $K=8$, $M=16$, $N=256$. Діапазон кодування чисел у кожному каналі автокорелятора $255^2 \cdot 256^2=16646400$.

Вибраний набір модулів: $p_1=25$, $p_2=27$, $p_3=28$, $p_4=29$, $p_5=31$. Їх добуток дорівнює $P=25 \cdot 27 \cdot 28 \cdot 29 \cdot 31=16991100$, що задовольняє умову однозначного кодування результатів обчислень в автокореляторі в системі залишкових класів базису Крестенсона.

У шифраторах автокорелятора виконується перетворення кодів залишків базису Хаара у двійкові коди базису Радемахера та перетворення їх з системи залишкових класів у двійкову систему з відкиданням 8 молодших розрядів як операції ділення на N згідно з формулою обчислення коваріаційної функції.

Отже, наприклад, при тактовій частоті спрацювання мікроелектронних вентилів 100 МГц тактова частота виконання операції додавання та множення у відомому кореляторі буде приблизно у 100 разів нижчою, що призводить до низької швидкодії відомих кореляторів, які працюють у двійковій системі числення базису Радемахера.

Висновок

Показано, що цифрові процесори опрацювання інформаційних потоків можуть реалізовуватися на основі семи аналітичних виразів кореляційних функцій (знакова, релейна, коваріаційна, кореляційна, структурна, модульна, еквівалентності) та п'ятих широкоживаних ТЧБ (унітарного, Хаара, Радемахера, Крестенсона, Галуа). За рахунок обчислення коваріаційної функції на основі представлення цифрових відліків x_i та x_{i-j} базису Хаара–Крестенсона системи залишкових класів реалізуються одноканальні перемноження та підсумування кодів залишків у вентильних матрицях перемноження та підсумування, що забезпечує максимально високу швидкодію автокорелятора. Швидкодія розробленого автокорелятора не залежить від розрядності АЦП – K , об'єму вибірки – N та кількості каналів автокорелятора – M . Матриці модульного перемножувача та суматора реалізуються на основі типових програмовано-логічних матриць (ПЛМ).

1. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Я.М. Николайчук. – Тернопіль: ТзОВ “Тернограф”, 2010. – 536 с.
2. Албанський І.Б. Дослідження інформативності алгоритмів процесорів обчислення автокореляційних функцій / Албанський І.Б. // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Том 16. – № 3. – С. 227–235.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятности. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. Ланге Ф.Г. Корреляционная электроника. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 448 с.
5. Колмогоров А.Н. Теория вероятности и математическая статистика [Сб.] / Отв.ред. Ю.В. Прохоров; [АН СССР, Отд-ние математики]. – М.: Наука, 1986. – 534 с.
6. Мирский Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. – М.: Энергия, 1972. – 456 с.
7. Серебряников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука, 1965. – 244 с.
8. Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
9. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації / Николайчук Я.М. – 2-ге вид., випр. – Тернопіль: ТзОВ “Тернограф”, 2010. – 536 с.
10. Сегін А.І. Оцінка впливу старіння інформації на кореляційній моделі багатоканальних об'єктів управління / Сегін А.І. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – № 36. Т6 – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. – С. 80–88.
11. Kenefic R.J., Barchak J.E. Exact Detection Performance for Broadband Correlators // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Mar. 1983, AES-19, pp.320-322.
12. Николайчук Я.М. Функции взаимокорреляционной связи и их применение для вычисления структурной функции / Николайчук Я.М. // Тезисы докладов II Всесоюз. конф. “Технические средства для диагностики заболеваний ССС”. – Москва, 1987.
13. Пітух І., Николайчук Я., Возна Н. Принципи побудови комп'ютерних мереж з глибоким розпаралелюванням інформаційних потоків на основі матричних моделей руху даних // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2004. – № 508. – С. 263–268.
14. Албанський І.Б. Дослідження системних характеристик складності кореляційних спецпроцесорів, реалізованих у різних ТЧБ / Албанський І.Б. // Поступ в науку: зб. наук. праць Бучацького інституту менеджменту і аудиту. – Бучач. – 2010. – № 6. – С. 67.