

# СИНТЕЗ СИСТОЛИЧНОГО ПРОЦЕСОРА ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРЯМИХ МЕТОДІВ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

Колесніков О.М.

Північно-східна філія Державного підприємства  
«Український державний центр радіочастот»,  
Україна

E-mail: [kan1962doka@gmail.com](mailto:kan1962doka@gmail.com)

---

## Abstract

*On the basis of the vectorized adaptation algorithm for centrally symmetric antenna arrays, a systolic processor is synthesized for the implementation of direct methods of space-time signal processing with correlation matrices of the type of Toeplitz and block-Toeplitz.*

---

Забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів (РЕЗ) є однією з основних проблем, що стоять перед розробниками сучасних засобів, комплексів та систем радіозв'язку. В багатьох РЕЗ для підвищення завадостійкості та енергетичного потенціалу радіоліній використовуються методи просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС) на основі застосування адаптивних антенних решіток (АР).

Реалізація алгоритмів адаптації АР може бути виконана як із застосуванням градієнтних процедур мінімізації цільових функцій, так і прямих методів ПЧОС, де процедури адаптації АР зводяться до рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь, незалежно від обраного критерію та ґрунтуються на відповідних методах лінійної алгебри [1].

Прями методи ПЧОС засновані на оберненні або псевдооберненні кореляційної матриці (КМ) зовнішніх впливів  $R_{xx}$  та спрямовані на знаходження вектору вагових коефіцієнтів (ВВК) АР у відповідності з виразом:

$$\dot{W} = R_{xx}^{-1} \dot{S}, \quad (1)$$

де  $\dot{W} \in C^L$  – комплексний ВВК коефіцієнтів, що характеризує амплітудно-фазовий розподіл токів по розкритву АР;  $R_{xx} \in C^{L \times L}$  – КМ зовнішніх впливів;  $\dot{S} \in C^L$  – вектор, що задає хвильовий фронт корисного сигналу;  $L$  – розмірність АР.

При цьому, ефективність прямих методів адаптації АР залежить від типу КМ. Якщо КМ належить до матриць спеціального типу (теплицевої, блочно-теплицевої, циркулянтної, блочно-циркулянтної), то обчислювальна складність таких методів може бути знижена з  $O(N^3)$  до  $O(N^2)$  [2].

В лінійній еквідистантній АР КМ  $R_{xx}$  є теплицевою, а у прямокутній еквідистантній АР – блочно-теплицевою [3]. Однак, на практиці, необхідно враховувати, що при використанні прямих методів адаптації АР значення самих КМ  $R_{xx}$  в (1) апріорно невідомі та можуть бути отримані лише їх вибіркові оцінки. В той же час, вибіркові КМ вже не відносяться до матриць спеціального виду навіть в тих випадках, коли реальні КМ мають подібні властивості. Питання апроксимації вибіркових КМ теплицевими матрицями та аналіз похибок такої апроксимації розглянути в [3].

Метою роботи є синтез систолічного процесора (СП) для рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (1) в адаптивних АР з теплицевими КМ  $R_{xx}$  шляхом відображення векторизованого алгоритму послідовного рішення усічених систем на систолічний масив.

Використання СП для реалізації алгоритмів просторово-часової обробки сигналів (ПЧОС) має ряд переваг в порівнянні з іншими способами, до основних з яких відноситься висока ступень розпаралелювання і, відповідно, висока швидкодія та технологічність виготовлення у вигляді надвеликих інтегральних схем.

Векторизований алгоритм адаптації АР з теплицевими або блочно-теплицевими КМ, отриманий на основі [2], має вигляд:

$$c^{(o)} = [r_{-1}, r_{-2}, \dots, r_{-L+1}]^T \quad (2)$$

$$\alpha_o^{(o)} = I, p_o^{(o)} = r_o^{-1}, w_o^{(o)} = r_o^{-1} s_1; \quad (3)$$

$$Y^{(o)} = [r_{-1}, r_{-2}, \dots, r_{-L+1}]^T w_1^{(o)+}; \quad (4)$$

$$f_k = c_1^{(k-1)}, \varepsilon_k = s_{k+1} - y_1^{(k-1)}, r_k' = p_k \varepsilon_k^+; \quad (5)$$

$$\xi_k = -p_{k-1} f_k, p_k = (I - \xi_k^2)^{-1} p_{k-1}; \quad (6)$$

$$[\alpha_o^{(k)}, \alpha_1^{(k)}, \dots, \alpha_k^{(k)}]^T = [\alpha_o^{(k-1)}, \alpha_1^{(k-1)}, \dots, \alpha_{k-1}^{(k-1)}, 0]^T + [0, \alpha_o^{(k-1)}, \alpha_1^{(k-1)}, \dots, \alpha_{k-1}^{(k-1)}]^T \xi_k^+; \quad (7)$$

$$c^{(k)} = c^{(k-1)} + [c_2^{(k-1)}, c_3^{(k-1)}, \dots, c_{L-1}^{(k-1)}, 0]^T \xi_k^+; \quad (8)$$

$$Y^{(k)} = [y_2^{(k-1)}, y_3^{(k-1)}, \dots, y_{L-1}^{(k-1)}]^T + c^{(k)} r_k^{1+}; \quad (9)$$

$$[w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_{k+1}^{(k)}]^T = [w_1^{(k-1)}, w_2^{(k-1)}, \dots, w_k^{(k-1)}, 0]^T + [\alpha_o^{(k)}, \alpha_1^{(k)}, \dots, \alpha_k^{(k)}]^T r_k^{1+}, \quad (10)$$

де  $r_o, r_{-1}, \dots, r_{-L+1}$  - елементи теплицевої КМ  $R_{xx}$

$$R_{xx} = \begin{bmatrix} r_o & r_{-1} & \dots & r_{-L+1} \\ r_{-1} & r_o & r_{-1} & \dots & r_{-L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{-L+1} & r_{-L} & \dots & r_o \end{bmatrix};$$

$s_i$  -  $i$  - й елемент вектора  $S$ ;  $k = 1, L-1$ . При  $k = L-1$  отримуємо значення ВВК  $W$ , що обчислюється.

Користуючись методикою синтезу СП, що запропонована в [4], побудуємо  $\Gamma$ -решітчастий граф алгоритму (2) - (10). Для випадку  $L = 5$  він зображений на рис. 1, а. При цьому, вершини графу з координатами  $k \neq 0, 0 < m \leq L-1$  відповідають обчислюванням  $c_m^{(k)}, y_m^{(k)}$ , а вершини з координатами  $m \geq L-k-1$  - обчислюванням  $\alpha_{m-L+k-1}^{(k)}, w_{m-L+k}^{(k)}$ . В вершинах з  $m = 0, 0 < k \leq L-1$  обчислюються значення  $p_k, \xi_k, r_k'$ , а в вершинах з  $k = 0, m = L-1$  - значення  $\alpha_o^{(L-1)}, w_1^{(L-1)}$ . Вершини з  $k \leq 0, k \geq L$  не містять операцій, що виконуються, та призначені для передачі даних.

З кожної вершини графу  $\Gamma$  виходять дуги, по яким здійснюється обмін інформацією. Так, по дугам, що інцидентні вершинам з  $0 \leq k < L-1$  та  $m \neq 0$  з напрямом  $(1, 0)^T$ , передаються

значення  $c_m^{(k)}$ , з напрямом  $(1, -1)^T - c_m^{(k)}, y_m^k$ . При  $k \geq L-m-1$  по дугам  $(1, 0)^T$  и по дугам  $(1, -1)^T$  пересилаються  $\alpha_{m-L+k-1}^{(k)}$ . З вершин з  $m=0, 0 \leq k \leq L-1$  по дугам  $(1, 0)^T$  передаються значення  $p_k$ , а за напрямом  $(0, 1)^T$  усі вершини з  $0 \leq k \leq L-1, m \neq L-1$  пересилають значення  $\xi_k$ . Критичний шлях по графу  $\Gamma$  без врахування вхідних та вихідних дуг дорівнює  $3L-5$ , а з їх урахуванням  $5L-7$ .

Граф  $\Gamma$  (рис. 1, а) є графом СП, що реалізує алгоритм (2) – (10). Вершини  $\Gamma$  відповідають обчислювальним коміркам СП, а дуги – зв'язкам між ними. Синтезований по графу  $\Gamma$  СП зображений на рис. 1, б, [5] з якого видно, що СП складається з двох типів процесорних елементів (ПЕ) – рис. 1, в, г відповідно. Ці ПЕ виконують такі операції:

$$\begin{aligned} \alpha_{out}^{(1)} &= \alpha_{in}^{(1)} + c_{in}^{(1)} g_{in}^{(1)}, & b_{out}^{(1)} &= e_{in}^{(1)} + b_{in}^{(1)} g_{in}^{(1)}; \\ c_{out}^{(1)} &= \alpha_{in}^{(1)} + c_{in}^{(1)} g_{in}^{(1)}, & d_{out}^{(1)} &= d_{in}^{(1)} + \alpha_{in}^{(1)} h_{in}^{(1)}; \\ e_{out}^{(1)} &= e_{in}^{(1)} + b_{in}^{(1)} g_{in}^{(1)}, & f_{out}^{(1)} &= f_{in}^{(1)} + e_{in}^{(1)} h_{in}^{(1)}; \\ g_{out}^{(1)} &= g_{in}^{(1)}, & h_{out}^{(1)} &= h_{in}^{(1)} \end{aligned}$$

у першому ПЕ та

$$\begin{aligned} b_{out}^{(2)} &= (1 - b_{in}^{(2)2} d_{in}^{(2)2}) b_{in}^{(2)}, & e_{out}^{(2)} &= e_{in}^{(2)}; \\ f_{out}^{(2)} &= f_{in}^{(2)} + e_{in}^{(2)} (1 - b_{in}^{(2)2} d_{in}^{(2)2}) b_{in}^{(2)} (\alpha_{in}^{(2)} - c_{in}^{(2)}); \\ g_{out}^{(2)} &= -b_{in}^{(2)} (\alpha_{in}^{(2)} - c_{in}^{(2)}); \\ h_{out}^{(2)} &= (1 - b_{in}^{(2)2} d_{in}^{(2)2}) b_{in}^{(2)} (\alpha_{in}^{(2)} - c_{in}^{(2)}) \end{aligned}$$

у другому ПЕ відповідно.

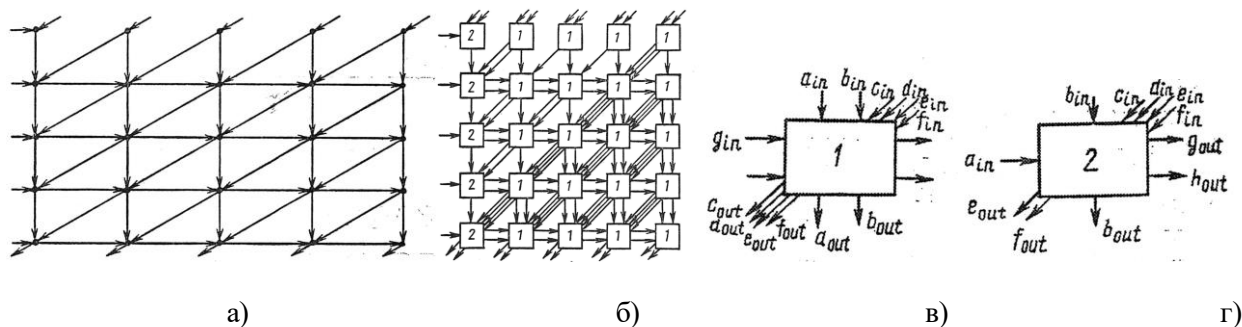


Рис. 1. Г- Решітчастий граф (а), СП (б) та ПЕ (в, г) для реалізації алгоритму (2) – (10)

Таким чином, на основі векторизованого алгоритму (2) – (10) синтезований СП (рис. 1, б) для рішення лінійного алгебраїчного рівняння (1) з теплицевою КМ  $R_{xx}$ , який можливо використовувати в системах швидкої ПЧОС з лінійними еквідистантними АР. Отриманий результат також може бути використаний для систем ПЧОС з прямокутними еквідистантними АР тому, що комплексна КМ  $R_{xx}$  в прямокутній еквідистантній АР ( $L_1 \times L_2 = L$ ) є блочно-теплицевою (теплицевою матрицею теплицевих матриць). Причому, кількість блоків, що створюють теплицеву матрицю, дорівнює  $L_2 \times L_2$ , а розмірність кожного з блоків, що представляють собою теплицеві матриці, дорівнює  $L_1 \times L_1$ .

## Література:

1. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-х частях. Часть 1.: В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев, О.И. Лагутенко, Щесняк А.С./ Под общ. ред. В.А. Григорьева. – СПб: Университет ИТМО, 2016. –179 с.
2. Тыртышников Е.Е. Параллельные вычисления с теплицевыми матрицами // Вычислительные процессы и системы. Вып. 5, М.: Наука, 1987. – С. 37-41.
3. Абрамович Ю.И., Аров Д.З., Качур В.Г. Адаптивные фильтры компенсации помех, соответствующие теплицевой структуре корреляционной матрицы. – М.: Радиотехника и электроника, 1987, Т. 32, № 12, С. 2525–2533.
4. Краснов С.А. Отображение вычислительных алгоритмов на систолические массивы // Вычислительные процессы и системы. Вып. 5, М.: Наука, 1987. – С. 82-92.
5. Глушанков Е.И., Колесников А.Н. Синтез систолического вычислителя для реализации алгоритма пространственной обработки сигналов // Радиотехника. 1991, № 4. С. 40-42.