

Л.А. МАРЧУК, канд. техн. наук, Л.А. ТИТАРЕНКО, канд. техн. наук,  
А.В. ЕФИМОВ

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ

Известно, что адаптивные антенные решетки (ААР) могут применяться для разделения сигналов (сигналов и помех), приходящих с различных направлений. При этом, в отличие от традиционной схемы ( $N$  входов — 1 выход), такие ААР представляют собой следующую структуру:  $N$  входов —  $L$  ( $L < N$ ) выходов [1;2]. В общем случае алгоритм адаптивного пространственного разделения (АПР) можно выразить в виде двухэтапной процедуры. Она включает в себя: определение направлений прихода всех входных сигналов; расчет  $L$  векторов весовых коэффициентов  $\vec{W}_j$ , каждый из которых определяет диаграмму направленности с нулями в направлениях прихода всех сигналов, за исключением  $j$ -го. Указанный подход, наряду с собственно разделением, позволяет обеспечить в каждом  $j$ -м канале максимизацию усиления полезного ( $j$ -го) сигнала. Однако двухэтапные процедуры АПР из-за отсутствия обратных связей чрезвычайно чувствительны к точности определения направлений прихода сигналов, расчета ВВК, что обуславливает жесткие требования к технической реализации диаграммообразующих схем.

Цель данной работы — синтез алгоритмов АПР с обратной связью (ОС).

Рассмотрим  $N$ -элементную линейную эквидистантную антенную решетку (АР), состоящую из идентичных антенных элементов (АЭ). Этой АР поставим в соответствие алгебраический полином степени  $N - 1$ :

$$F(z) = z^{N-1} + w_1 z^{N-2} + \dots + w_{N-2} z + w_{N-1}. \quad (1)$$

Здесь  $w_j$  ( $j = \overline{1, N-1}$ ) — коэффициенты полинома;  $z = e^{j\psi}$ , где  $\psi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \Theta$ ;  $d$  — расстояние между антенными элементами;  $\Theta$  — угол прихода сигналов;  $\lambda$  — длина волны сигнала.

Согласно [2] алгоритм АПР можно записать в различном виде, применив:

1. Представление (1) в эквивалентной форме:

$$F(z) = (z - a_1)(z - a_2) \dots (z - a_{N-1}), \quad (2)$$

где  $a_j$  — корни полинома (1).

2. Исключение из (2)  $j$ -го корня путем деления на  $(z - a_j)$ :

$$F_j(z) = (z - a_1)(z - a_2) \dots (z - a_{j-1})(z - a_{j+1}) \dots (z - a_{N-1}). \quad (3)$$

3. Перевод (3) в аддитивную форму

$$F_j(z) = z^{N-2} + w_{1i} z^{N-3} + \dots + w_{N-3i} z + w_{N-2i} \quad (4)$$

и использование  $\vec{W}_j = [w_{1i}, \dots, w_{N-2i}]$  в качестве вектора весовых коэффициентов  $j$ -го канала.

Заметим, что коэффициенты полинома (4) с точностью до постоянно-го коэффициента совпадают с коэффициентами полинома  $(N - 2)$ -й степени, получающегося в результате дифференцирования (2) по  $a_j$ . Исходя из отмеченной аналогии, реализуем следующий подход к синтезу алгоритмов АПР: представим выходной сигнал  $N$ -элементной АР в виде функции корней полинома (2), сформируем выходные сигналы каждого из  $L$  каналов с помощью дифференцирования исходного полинома по соответствующим корням, а для нахождения собственно корней применим рекуррентные процедуры с ОС [3].

Для сокращения объема выкладок ограничимся случаем  $N = 3$  и перепишем полином (1) в виде

$$z^2 + pz + q, \quad (5)$$

где коэффициенты  $p$  и  $q$  можно рассматривать как весовые коэффициенты ААР, реализующей критерий минимума мощности выходного сигнала [3].

Используя соотношения, вытекающие из теоремы Виета, представим выходной сигнал трехэлементной АР в виде

$$\begin{aligned} y(p, q) &= x_1 + x_2 p + x_3 = x_1 + (-a_1 - a_2) x_2 + (a_1 a_2) x_3 = x_1 - a_1(x_2 - a_2 x_3) - a_2 x_2 \\ &= x_1 - a_2(x_2 - a_1 x_3) - a_2 x_2, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  — суммарные сигналы на входах первого, второго и третьего АЭ.

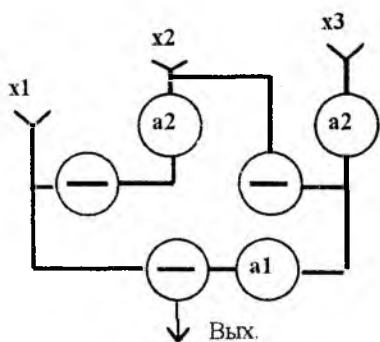


Рис. 1

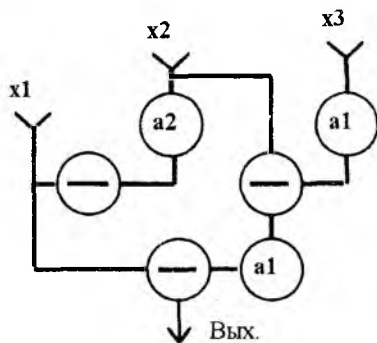


Рис. 2

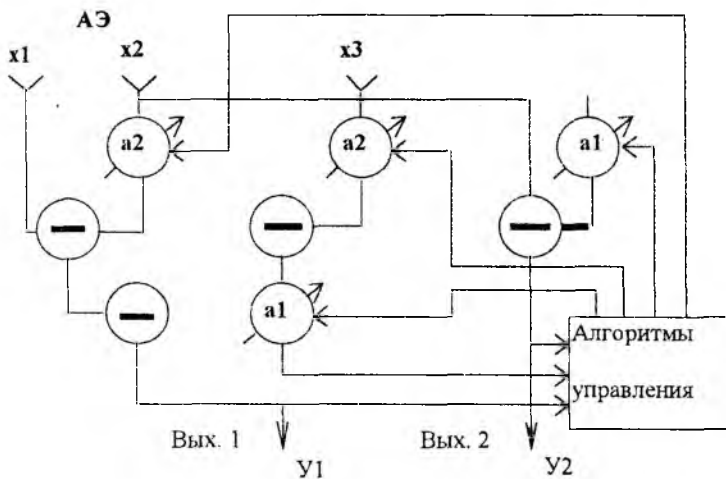


Рис. 3

Согласно (6) можно получить структурные схемы ААР, представленные на рис. 1, 2. Для синтеза алгоритмов расчета коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2$  сформируем оптимизационную задачу

$$\min_{a_1, a_2} \Phi(a_1, a_2); \quad \Phi(a_1, a_2) = E \left\{ \left( y^2(a_1 a_2) \right) \right\}, \quad (7)$$

где  $y(a_1, a_2)$  — суммарный выходной сигнал;  $E\{\cdot\}$  — знак математического ожидания. Для строгого решения задачи синтеза необходимо сначала

выполнить усреднение в (7), а затем продифференцировать полученное выражение. Однако для удобства реализации будем сразу ориентироваться на мгновенные отсчеты входных сигналов, т.е. перейдем к целевой функции  $\hat{\Phi}(a_1, a_2) = y^2(a_1, a_2)$ . Применяя для минимизации  $\hat{\Phi}(a_1, a_2)$  градиентный метод, запишем [3]

$$\begin{cases} a_1(k+1) = a_1(k) - \mu(k)y(k+1)(a_2(k)x_3(k+1) - x_2(k+1)); \\ a_2(k+1) = a_2(k) - \mu(k)y(k+1)(a_1(k)x_3(k+1) - x_2(k+1)), \end{cases} \quad (8)$$

где  $\mu(k)$  — шаговая постоянная.

Заметим, что множители  $(a_2x_3 - x_2)$ ,  $(a_1x_3 - x_2)$  фактически представляют собой выходные сигналы ААР, полученные на основе (1) — (4). Следовательно, (8) можно выразить в виде

$$\begin{cases} a_1(k+1) = a_1(k) - \mu(k)y(k+1)y_1(k+1); \\ a_2(k+1) = a_2(k) - \mu(k)y(k+1)y_2(k+1), \end{cases} \quad (9)$$

где  $y_1(k), y_2(k)$  — первый и второй выходные сигналы ААР.

Сходимость алгоритмов (8), (9) к решению задачи (7) можно доказать, основываясь на методе стохастической аппроксимации.

Исходя из (9) формируем структурную схему ААР с ОС на два выхода (рис. 3). В данной ААР используются ОС по обоим сигнальным выходам. Очевидно, что рассмотренный подход естественным образом обобщается для  $N$ -мерного случая и позволяет синтезировать алгоритм АГР и соответствующие структурные схемы ААР.

**Список литературы:** 1. *Shales M., Hackett J.R.* Adaptive arrays can be used to separate communication signal // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System. 1981. N 2. P. 234 — 246. 2. *Shan T.J., Kailath T.* Directional signal separation by adaptive array root-tracking algorithm // IEEE Proc. Intern. Conf. Acoustic Speech and Signal Process, Dallas, 1987. New York, 1987. Vol. 4. P. 53.8.1 — 53.8.4. 3. *Марчук Л.А.* Пространственно-временная обработка сигналов в линиях радиосвязи. Л.: Воен. акад. связи, 1991. 133 с.

*Харьковский государственный технический университет радиозлектроники*

*Поступила в редколлегию 27.03.98*