

## Адаптивни антени решетки с разширение на нулата на диаграмата на антената и компенсирано взаимно влицие между излъчвателите

Йордан Бозмаров

Физически факултет, Софийски университет “Св. Кл. Охридски”,  
бул. Дж. Баучер 5, 1164 София

**Abstract.** This paper considers mathematical model of linear adaptive antenna array, using the embedded amplitude-phase patterns of each radiator, taking into account the edge effects and mutual coupling. The method and algorithm are developed for the null broadening of the antenna patterns into jammer direction. The angular sector of the jammer suppression is adaptively adjusted without affecting the previously formed zeros of the antenna pattern towards the other jammers, the side-lobes level, antenna gain and the cross-polarization ratio. A programme package in MatLab is developed on the basis of this mathematical model. The simulation results of a linear array of 8 waveguide slots shielded in cylindrical cavities and radiating in the X-band is presented in figures and tables. The embedded complex patterns of the slot radiators simulated with HFSS are included in the simulation model. The experimentally measured complex embedded patterns of each element can be included in the applied algorithm. The developed method and algorithm for null broadening is also applicable for planar, conformal, and other types of array configurations.

### 1 Въведение

Адаптивните антени решетки са многоканални системи за пространствена обработка на сигналите и оптимизация на отношението сигнал/шум в присъствието на преднамерени или друг тип смущения.

Тези антени намират широко приложение в радарната техника, антените за базовите станции на широколентовите мобилни комуникации, хидролокаторите, сателитната комуникация и др.

В радарната техника преднамерените смущения, насочени към диаграмата на антената, водят до повишаване на шума на входа на

приемника, намаляване на способността на радара да детектира отделени цели, създават лъжливи цели, затрудняват и може да блокират радарната система за автоматично следене.

Подтискането на пространствено разпределените преднамерени смущения се извършва чрез формиране на нули на диаграмата на насоченост (ДН) на антената по посока на смущенията.

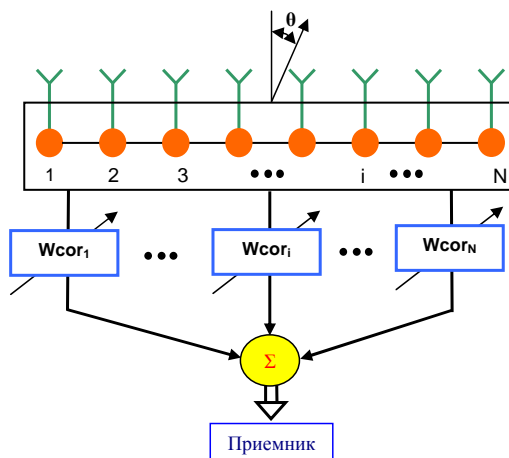
Когато ъгловото отстояние между смущенията е по-малко от широчината на главния лист на компенсационната диаграма на насоченост, техниката на т.нар. разширение на нулата се прилага, за да се подтиснат тези смущения и да се оптимизира отношението сигнал/шум.

Основните цели на настоящето изследване са:

1. Формиране на нули на ДН по посока на смущенията;
2. Метод за разширение на нулата на ДН по посока на смущенията;
3. Прилагане на метода за адаптивната антена в обстановка на няколко източника на преднамерени смущения, използвайки реалните включени (embedded) диаграми на антенните елементи, отчитайки взаимното влияние между тях и краевите ефекти.

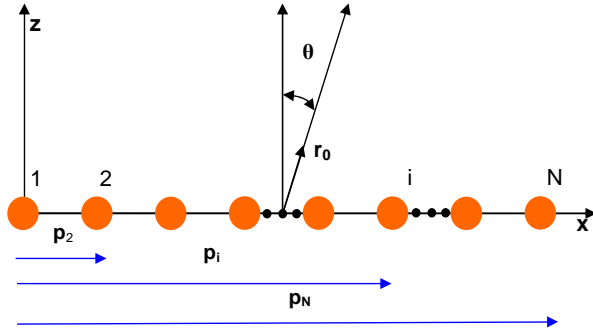
## 2 Математически модел на адаптивната антена

Схема на адаптивната антена е представена на Фиг. 1. Това е една линейна антенна решетка от  $N$  излъчватели. Приетият сигнал от всеки



Фиг. 1

Адаптивни антени решетки с разширение на нулата на ...



Фиг. 2

един излъчвател е умножен с комплексния коефициент  $W_{\text{сog}_i}$  като след това се сумират в съставен сигнал на входа на приемника за сигнална обработка.

Модел на линейната антена решетка е представен на Фиг. 2.

Векторите, използвани в математическия модел, са следните:

–  $\mathbf{P}$  е вектор-стълб на позициите с дименсия  $[N \times 1]$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

където  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N$  са векторите на позициите.

– насочената вълнова константа  $\mathbf{k}$  се изразява чрез  $\mathbf{k} = 2\pi/\lambda \mathbf{r}_0$ , където  $\lambda$  е дължината на вълната в свободното пространство, а  $\mathbf{r}_0$  е единичен вектор на посоката  $|\mathbf{r}_0| = 1$ .

–  $\mathbf{V}(\theta)$  е вектор-стълб на антенната решетка с дименсия  $[N \times 1]$

$$\mathbf{V}(\theta) = \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{P}) = \begin{bmatrix} \exp(j2\pi/\lambda \sin \theta p_1) \\ \exp(j2\pi/\lambda \sin \theta p_2) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi/\lambda \sin \theta p_N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

–  $\mathbf{S}$  е вектор-ред на сканирането

$$\mathbf{S}(\theta_d) = \mathbf{V}(\theta - d)^*, \quad (3)$$

$\theta_d$  е посоката на главния максимум.

Йордан Бозмаров

—  $\mathbf{W}$  е вектор-ред на амплитудното разпределение на антенната решетка

$$\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_N]. \quad (4)$$

$w_i$  са коефициентите на амплитудното разпределение по оста на решетката.

Ще използваме реални излъчватели в решетката, взимайки под внимание взаимното им влияние и краевите ефекти.

Нека  $F(\theta)_{el1}, F(\theta)_{el2}, \dots, F(\theta)_{elN}$  са комплексните реални (embedded) диаграми на антенните елементи.

$\mathbf{F}_{el}(\theta)$  е вектор-стълб на включените embedded диаграми

$$\mathbf{F}_{el}(\theta) = \begin{bmatrix} F_{el1}(\theta) \\ F_{el2}(\theta) \\ \vdots \\ F_{elN}(\theta) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Антенната диаграма се изразява както следва:

$$\mathbf{F}(\theta) = [\mathbf{W} \cdot \text{diag}(\mathbf{S}(\theta))] \cdot [\text{diag}(\mathbf{F}_{el}(\theta)) \cdot \mathbf{V}(\theta)]. \quad (6)$$

Ако  $\mathbf{W}_d$  е векторът на комплексните коефициенти за сканиране на лъча в посока  $\theta_d$

$$\mathbf{W}_d = \mathbf{W} \cdot \text{diag}(\mathbf{S}(\theta_d)). \quad (7)$$

$\mathbf{W}_n$  векторът на комплексните коефициенти за сканиране на лъча в посока смущението  $\theta_n$

$$\mathbf{W}_n = \mathbf{W} \cdot \text{diag}(\mathbf{S}(\theta_n)). \quad (8)$$

Тогава комплексната ДН с нула по посока на смущението  $\theta_n$  се изразява с формулата

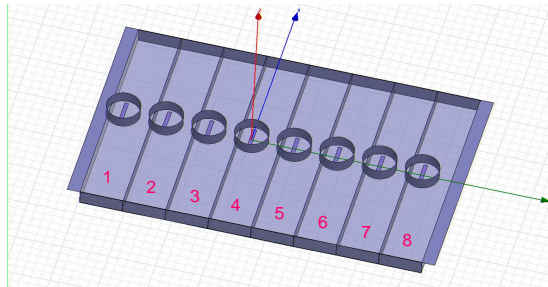
$$\mathbf{F}(\theta) = \mathbf{W}_{\text{corr}} \cdot [\text{diag}(\mathbf{F}_{el}(\theta)) \cdot \mathbf{V}(\theta)], \quad (9)$$

$\mathbf{W}_{\text{corr}}$  е коригираното комплексно разпределение, за да се насочи лъча на ДН в посока  $\theta_d$  и да се формира нула в посока на смущението  $\theta_n$ :

$$\mathbf{W}_{\text{corr}} = \mathbf{W}_d - \frac{\mathbf{W}_d \cdot [\text{diag} \mathbf{F}_{el}(\theta_n) \cdot \mathbf{S}^*(\theta_n)]}{\mathbf{W} \cdot \mathbf{F}_{el}(\theta_n)} \cdot \mathbf{W}_n. \quad (10)$$

За да получим т.нар. разширяване на нулата на ДН по посока на смущенията, извършваме итерационен цикъл с последователно намиране на стойностите на  $\mathbf{W}_{\text{corr}}^{(i)}(\theta_{n1}), \mathbf{W}_{\text{corr}}^{(i)}(\theta_{n2})$  от формула (10), където  $\theta_{n1}$  и  $\theta_{n2}$  са стойности, близки до  $\theta_n$ .

Адаптивни антени решетки с разширение на нулата на ...

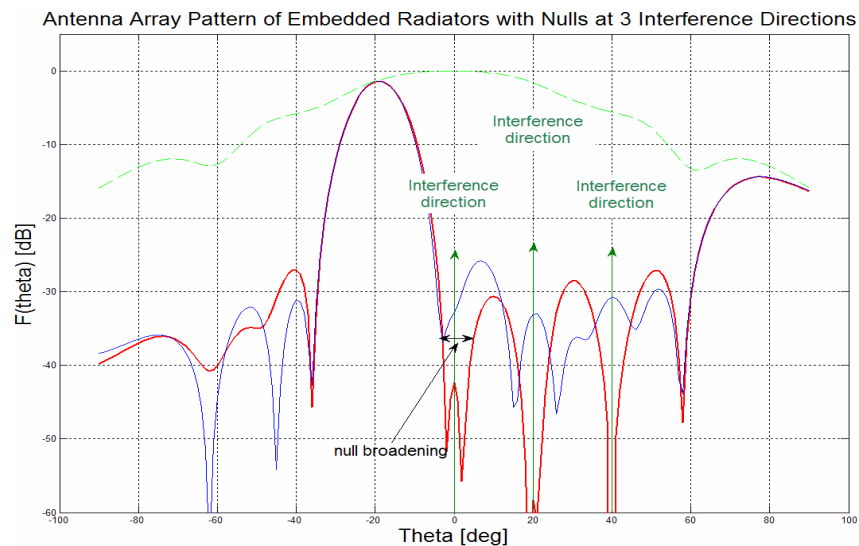


Фиг. 3

Електромагнитен модел на линейна вълноводна решетка с надлъжни процеци, екранирани с цилиндрични резонатори, е симулиран с HFSS (Фиг. 3). Вълноводът е правоъгълен R100 с размери: 23mm/10mm, работната честота е  $f = 9.375$  GHz.

Програмен пакет в среда MatLab е разработен на базата на погоре описания математически модел. Реалните (embedded) диаграми, получени от електромагнитната симулация с HFSS, се използват в алгоритмите.

На Фиг. 4 е изобразен сценарий, когато синтезираната ДН има една нула с разширение и две допълнителни нули в посока смущенията. Вижда се, че с разработения метод за формирането на нули в ДН не



Фиг. 4

се влошават основните антенни параметри: коефициентът на насочено действие, нивото на страничните листа, формата на главния лист и др.

### 3 Изводи

Симулационните резултати с реалните (embedded) амплитудно-фазови диаграми показват, че подтискането на смущенията се получава в широк ъглов сектор, без това да влияе на предварително формираните нули на ДН в посока на други смущения, странични листа и усилване на антената.

Разработеният математически модел и програмен пакет за адаптивна неутрализация на смущенията чрез използване на алгоритъма за разширение на нулата може да бъде приложен за планарни и конформни антенни решетки.

Експерименталните (embedded) амплитудно-фазови антенни диаграми на всеки елемент от антенната решетка могат да се използват в разработения алгоритъм.

### Литература

- [1] Harry L. Van Trees, *Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0-471-22110-4
- [2] Arne Theil, *Adaptive Nullsteering of Main Lobe Jamming; Analysis of the ARTIST Trial*. IEEE International Radar Conference, 1995.
- [3] Klaus Hugel, Juha Laurila, Ernst Bonek, *Downlink Performance of Adaptive Antennas with Null Broadening*, Vehicular Technology Conference, 1999, IEEE, 49th
- [4] Програмни продукти: HFSS е програмен продукт на ANSOFT corp.; MATLAB е програмен продукт на MathWorks corp.