

Високо ефективна биномна антенна решетка с три елемента

Петър Апостолов*, Алексей Стефанов*

* Технически факултет, ЮЗУ „Неофит Рилски“, Благоевград, ул. Иван Михайлов, 66, България, 2700, e-mail: p_apostolov@abv.bg ; astef@abv.bg

Резюме. В статията се разглежда линейна антенна решетка от три елемента със следните свойства: елементите могат да се разполагат на произволно разстояние, без да се променя диаграмата на насоченост на множителя на решетката по азимут; диаграмата на множителя на решетката няма странични излъчвания по азимут; диаграмата на множителя на решетката може бъде произволно тясна. Изведени са аналитични изрази за множителя на решетката и неговите параметри. Демонстрирани са симулации на Matlab®.

High Efficiency Three Element Linear Array Antenna (Peter Apostolov, Alexey Stefanov). This paper discusses a linear array of three elements with the following properties: the elements can be located at any distance without changing the array factor pattern; the array factor has no azimuthal side lobes; the array factor mainlobe may be arbitrarily narrow. Analytical expressions for array factor and its parameters are proposed. Matlab® simulations have been demonstrated.

Увод

Линейните еквилидистантни (равноотстоящи) антенни решетки са тип антенни системи, които се използват за излъчване или приемане на електромагнитна мощност от определено пространствено направление. Те се състоят от еднакви антенни излъчватели (елементи) разположени на еднакво разстояние помежду си.

Излъчените от елементите електромагнитни вълни интерферират помежду си и образуват максимуми и минимуми на мощността в далечната зона. Пространственото разпределение на мощността се определя от диаграмата на насоченост на антенната решетка. Тя е функция на два пространствени ъгъла: θ по азимут и φ по елевация. Аналитичният израз е произведение на две функции: диаграма на излъчване на отделния елемент и множител на решетката. Основна задача при конструирането е определяне на множителя на решетката. Затова, в теорията се приема, че антенната решетка се състои от изотропни излъчватели, които излъчват еднакво и равномерно във всички посоки, и диаграмата на излъчване отделния елемент се приема за равна на единица.

Най-простата линейна антенна решетка се

състои от n равномерно разположени на разстояние d изотропни излъчватели. Решетката има пространствена селективност само в азимуталната равнина $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$. По елевация диаграмата е равномерна и няма селективни свойства.

При нечетен брой излъчватели нормираният множител на решетката се определя от тригонометричен полином [1, 2]

$$AF = 2 \sum_{i=1}^n a_i \cos((i-1)\psi); \psi = kd \sin(\theta - \alpha). \quad (1)$$

В уравнение (1) са означени: $k = 2\pi/\lambda$ – вълново число; λ – дължина на вълната; ъгълът α определя посоката на главния максимум. Коефициентите a_i изразяват амплитудите на токовете на елементите на решетката, а аргументът на $\cos(\cdot)$ – фазите.

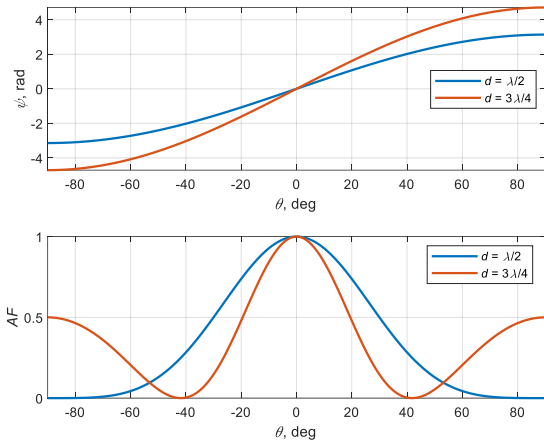
При еднакъв брой елементи селективността на множителя на решетката се определя от широчината на главния максимум (основния лист на) ниво половин мощност (-3dB) $\Delta\theta$ и относителното ниво на страничните излъчвания в dB.

Теоретични основания

За три елементна биномна антенна решетка [3] уравнение (1) има вида

$$AF(\psi) = 1 + 2 \cos \psi + \cos 2\psi . \quad (2)$$

Множителят на решетката няма странични излъчвания при междуелементно разстояние $d \leq \lambda/2$. При по-големи стойности се появяват странични излъчвания, тъй като $\cos(\cdot)$ е периодична функция – фигура 1.



Фиг. 1. Фазова функция и множител на решетката

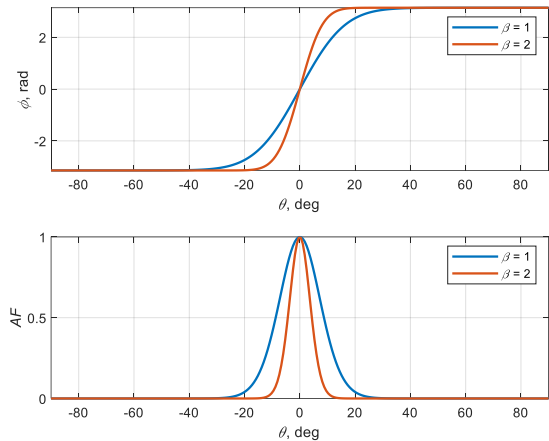
Очевидно е, че селективността на главния максимум нараства с увеличаване на интервала на граничните стойности на аргумента ψ .

Следователно, ако в (2) ψ се замени с друга, неперидична функция, с гранични стойности от минус $\pi/2$ до $\pi/2$, ще се получи множител на решетката без странични излъчвания и по-висока селективност на главния максимум.

На тези условия отговаря функцията

$$\phi = \pi \operatorname{erf}(\beta\psi) = \pi \operatorname{erf}(\beta\pi \sin(\theta - \alpha)); kd = \pi, \quad (3)$$

където $\operatorname{erf}(\cdot)$ е интегрална Гаусова функция на грешката, $\beta > 0$ е параметър, който променя стръмността на функцията. Описаните свойства са показани на фигура 2. Множителят на решетката няма странични излъчвания, а широчината на главния максимум $\Delta\theta$ може да бъде произволно малка, тъй като β може да е произволно голямо число.



Фиг.2. Фазова функция и множител на решетката

Функцията $\phi(\theta)$ се дефинира при условие $d = \lambda/2$, т.е. $kd = \pi$. Параметърът β се определя от условията: $kd = \pi$; $\alpha = 0^0$; $AF(\Delta\theta) = 1/\sqrt{2}$:

$$\beta = \frac{\operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{2}{\pi} \arccos \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}}}\right)}{\pi \sin(\Delta\theta/2)}, \quad (4)$$

където $\operatorname{erf}^{-1}(\cdot)$ е инверсна интегрална Гаусова функция на грешката.

Аналитичният израз на множителя на решетката има вида

$$AF(\phi) = 1 + 2 \cos \phi + \cos 2\phi . \quad (5)$$

Синтез на три елементна биномна антенна решетка с висока ефективност

Както беше отбелязано в предходната точка, биномната антенна решетка няма странични излъчвания само, когато междуелементно разстояние $d \leq \lambda/2$. Това ограничение може да бъде преодоляно, ако в (5) от ϕ се извади ψ . Физическият смисъл на това действие е, че се елиминира множителят на обикновената биномна антенна решетка (2), който в реални условия неминуемо се сумира с множителя (5). При това условие, за реализиране на тримерна симулация, множителят на решетката придобива вида

$$AF(\phi) = 1 + 2 \cos(\phi - \psi) + \cos(2\phi - 2\psi) . \quad (6)$$

Ще бъдат демонстрирани два примера за определяне на множителя на три елементна биномна антенна решетка. Симулациите са извършени на Matlab®2018b с помощта на Phased Array System Toolbox.

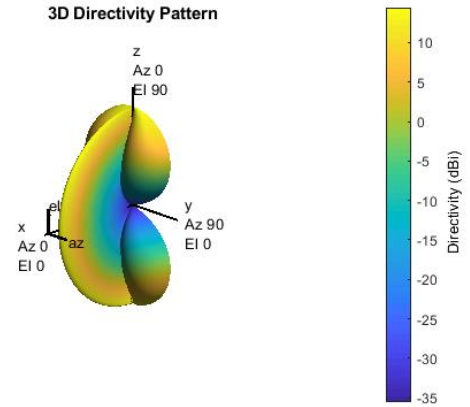
Пример 1

Изчисление на множител на биномна антенна

решетка в пространствена област по азимут $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$; по елевация $\varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$, с резолюция 1° . Параметри на антенната решетка: брой на елементите $n = 3$; дължина на вълната $\lambda = 30\text{cm}$; разстояние между елементите $d = \lambda/2$; ъгъл на сканиране $\alpha = 0^\circ$; ширина на диаграмата на ниво (-3dB) $\Delta\theta = 5^\circ$. От уравнение (4) се получава $\beta = 2.4359$.

Изчисляват се двумерни масиви на функциите $\phi(\theta, \varphi)$ и $\psi(\theta, \varphi)$. Амплитудните и фазови характеристики на всеки един от трите елемента се определят, в съответствие с формула (6), със системния обект `phased.CustomAntennaElement`. Антенната решетка се реализира със системния обект `phased.HeterogeneousULA`.

На фигури 3, 4 и 5 са показани диаграмите на насоченост по азимут, елевация и в тримерно пространство.



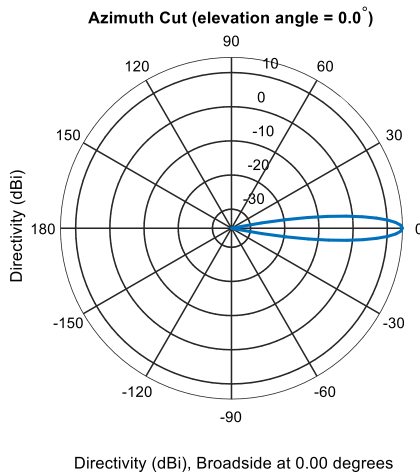
Фиг. 5. Множител на решетката в тримерно пространство, $\Delta\theta = 5^\circ$

Пример 2

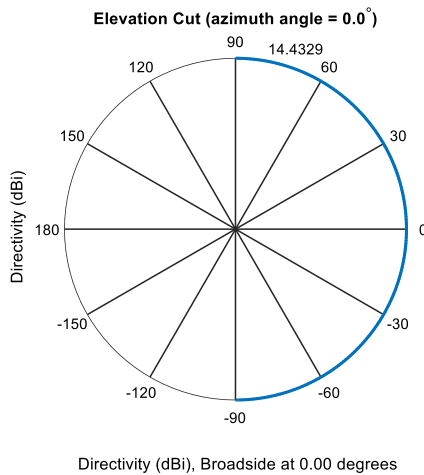
Изчисление на множител на антенна решетка в пространствена област по азимут $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$; по елевация $\varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$, с резолюция 1° . Параметри на антенната решетка: брой на елементите $n = 3$; дължина на вълната $\lambda = 10\text{cm}$; разстояние между елементите $d = 40\lambda$; ъгъл на сканиране $\alpha = 0^\circ$; ширина на диаграмата на ниво (-3dB) $\Delta\theta = 3^\circ$. От уравнение (4) се получава $\beta = 4.0565$.

Използва се същата процедура както в Пример 1. На фигури 6, 7 и 8 са показани диаграмите на насоченост по азимут, елевация и в тримерно пространство.

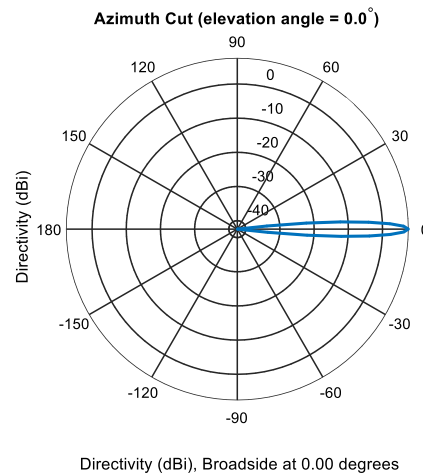
На фигури 9 и 10 са показани възможностите за сканиране по азимут при ъгъл $\alpha = 30^\circ$.



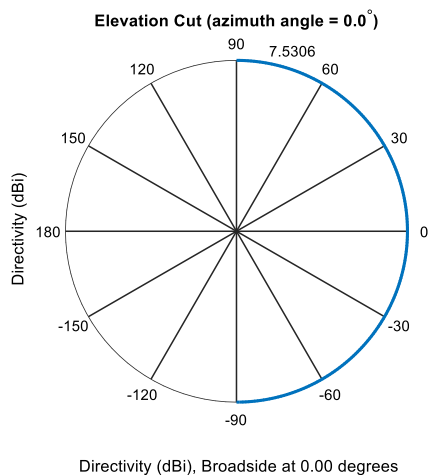
Фиг. 3. Множител на решетката по азимут, $\Delta\theta = 5^\circ$



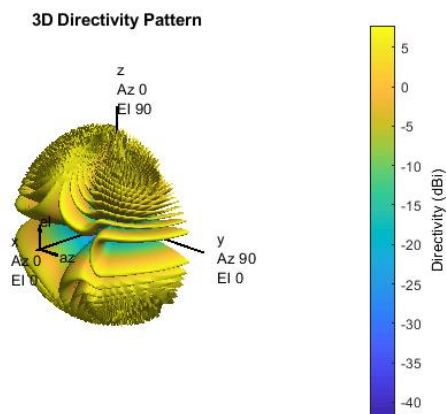
Фиг. 4. Множител на решетката по елевация



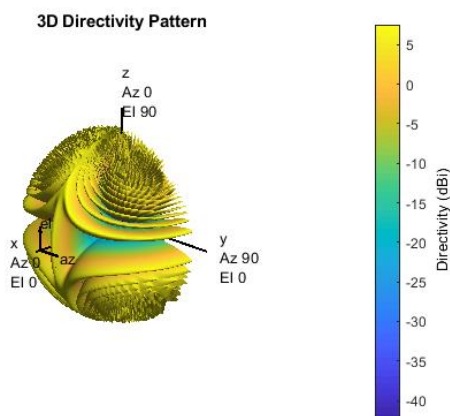
Фиг. 6. Множител на решетката по азимут, $\Delta\theta = 3^\circ$



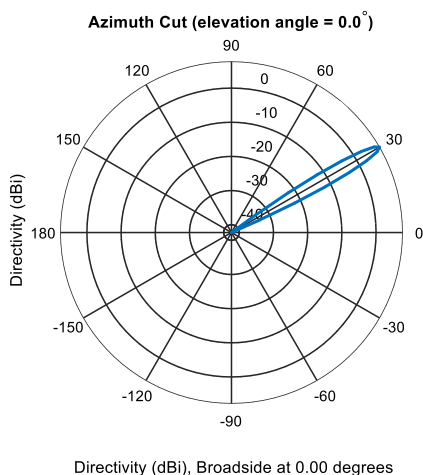
Фиг. 7. Множител на решетката по елевация



Фиг. 10. Тримерно изображение на сканиране по азимут, $\Delta\theta = 3^\circ$, $\alpha = 30^\circ$



Фиг. 8. Множител на решетката в тримерно пространство, $\Delta\theta = 3^\circ$



Фиг. 9. Сканиране по азимут, $\Delta\theta = 3^\circ$, $\alpha = 30^\circ$

Заклучение

В светлината на изложената теория и симулационни изследвания може да се направят следните по-важни изводи.

Предложена е неперидична функция (3) за промяна на фазата на токовете на биномна антенна решетка с три елемента.

Изведена е аналитична зависимост (4) между широчината на диаграмата на насоченост и параметъра β .

Предложен е оригинален подход (6) за елиминирание на страничните излъчвания по азимут и зависимостта на диаграмата на излъчване от междуелементното разстояние.

От приведените примери се вижда, че селективността на множителя на описаната антенна решетка не зависи от работната дължина на вълната и междуелементното разстояние.

Множителят на решетката се реализира само с три елемента, няма странични излъчвания, широчината на основния лист на диаграмата може да бъде произволно малка. Това определя селективност на решетката, която не може да бъде постигната с други методи.

Предложеният метод е приложим и за биномни антенни решетки с по-голям брой излъчватели.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Balanis, C. A. Antenna Theory Analysis and Design. John Wiley and Sons, 1982.
 [2] Sophocles J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, Rutgers University, 2014.
 [3] Stutzman, W, C Thiele. Antenna Theory and Design. John Wiley and Sons, 1981.