

УДК 621.396.67

А.І. Білоцький, аспір.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

ФОРМУВАННЯ У ЗАДАНОМУ НАПРЯМІ НУЛІВ ДІАГРАМ НАПРЯМЛЕНОСТІ ЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШТОК

Розглянуто можливість формування нулів діаграми напрямленості лінійної антенної решітки в напрямку завади вибором відповідного кроку решітки або еквівалентним відхиленням частоти. Отримані рівняння для визначення кроку решітки.

Як відомо [1], ефективним засобом боротьби із завадою, що надходить з визначеного (відомого) напрямку, є приймальна антена з регульованим напрямком нульового прийому. Орієнтація нуля діаграми напрямленості (ДН) у напрямку завади може теоретично повністю ліквідувати її, а на практиці – значно послабити (рис. 1). Але при цьому напрямок головного максимуму ДН відхиляється від напрямку прийомного сигналу, тому головна пелюстка ДН не повинна бути завузкою для того, щоб зміна напрямку нульового прийому не викликала значного послаблення корисного сигналу.

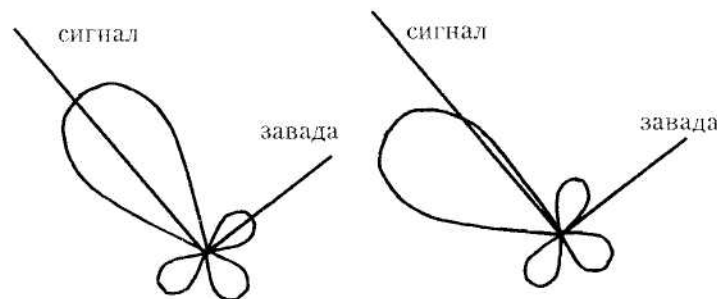


Рис. 1

Згідно з теоремою множення діаграм напрямленостей ДН антенної решітки (АР) [2]:

$$f(\theta) = f_{ea}(\theta)f_{\Sigma}(\theta), \quad (1)$$

де $f_{ea}(\theta)$ – ДН окремого елемента АР (випромінювача);

$f_{\Sigma}(\theta)$ – ДН системи ізотропних випромінювачів (множник решітки).

Таким чином, регулювати нуль ДН в АР можна або через множник системи, або через ДН випромінювача. Останнє ускладнено тим, що в АР частіше використовують слабконаправлені випромінювачі, тому перший шлях є перспективнішим.

Необхідно відзначити, що задача формування нуля множника решітки в потрібному напрямку має й інший, відмінний від вищезгаданого, контекст. У разі використання в АР напрямлених випромінювачів для підвищення її напрямлених властивостей виникає проблема бічних та задніх пелюсток ДН випромінювачів. В цьому випадку доречним є формування нулів множника решітки саме у цих напрямках.

Маємо ДН множника решітки [2]:

$$f_{\Sigma}(\theta) = \sum_{n=-M}^M \dot{A}_n e^{inkd \sin \theta}, \quad (2)$$

де M – помер крайнього випромінювача АР (рис. 2); \dot{A}_n – комплексна амплітуда сигналу в n -му випромінювачі; $k = 2\pi / \lambda$; λ – довжина хвилі; d – крок решітки (відстань між випромінювачами).

У випадку нормального випромінювання (головна пелюстка ДН напрямлена вздовж $\theta = 0$) \dot{A}_n можна вважати дійсною величиною: $\dot{A}_n = A_n$. Крім того, амплітудні розподіли $A_n = A(n)$, що використовуються на практиці, є парними, тобто $A(n) = A(-n)$, $A_n = A_{-n}$, тому вираз (2) можна звести до вигляду:

$$f_{\Sigma}(\theta) = A_0 + 2 \sum_{n=1}^M A_n \cos(nkd \sin \theta). \quad (3)$$

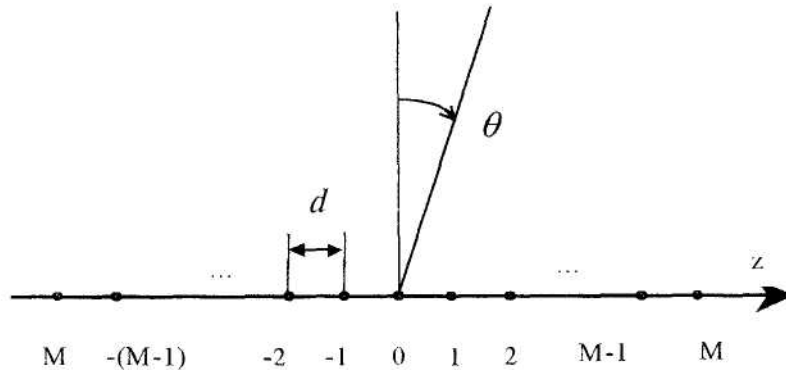


Рис. 2

Розподіл A_n є нормованим, а так як максимум для розподілів, що використовуються на практиці, припадає на $n = 0$, то $A_0 = 1$ і (3) набуде вигляду:

$$f_z(\theta) = 1 + 2 \sum_{n=1}^M A_n \cos(nkd \sin \theta). \tag{4}$$

Для формування нуля множника решітки в заданому напрямку θ_0 можна підібрати деяке значення кроку решітки d_0 , при якому $f_z(\theta_0) = 0$. Для цього необхідно розв'язати таке рівняння:

$$1 + 2 \sum_{n=1}^M A_n \cos(nkd_0 \sin \theta_0) = 0. \tag{5}$$

Розв'язком трансцендентного рівняння (5) буде нескінченний набір значень d_0 . З цього набору вибирається значення d_0 , що є найбільш близьким до заданого значення d .

У загальному випадку рівняння (5) не має аналітичного розв'язку, тому його розв'язання повинно проводитись чисельними методами. Однак в деяких конкретних випадках можливе отримання аналітичного виразу для шуканого кроку решітки d_0 . До них відносяться: випадок рівномірного амплітудного розподілу та випадок АР з великою кількістю елементів (багатослементної АР).

Для АР з рівномірним амплітудним розподілом $A_n = 1$ при будь-якому n , тому рівняння (5) можна звести до вигляду:

$$\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^M \cos(nkd_0 \sin \theta_0) = 0. \tag{6}$$

Ліва частина цього рівняння не що інше, як сума Діріхле, значення якої відоме [3], тому з (6) маємо:

$$\frac{\sin \frac{Nkd_0 \sin \theta_0}{2}}{\sin \frac{kd_0 \sin \theta_0}{2}} = 0. \tag{7}$$

Розв'язуючи рівняння (7), отримуємо:

$$d_0 = \frac{2\pi m}{Nk \sin \theta_0} = \frac{m\lambda}{N \sin \theta_0}, \quad m = 1, 2, \dots, \tag{8}$$

де $N = 2M + 1$ – загальна кількість елементів АР.

Серед значень (8) необхідно вибрати найбільш близьке до заданого d . Йому відповідає номер

$$m = \text{round} \left(d \frac{N \sin \theta_0}{\lambda} \right) = \text{round} \left(\frac{Nd \sin \theta_0}{\lambda} \right), \tag{9}$$

де функція $\text{round}(x)$ означає округлювання до найближчого цілого числа. У випадку, коли шукане значення d_0 не повинне перевищувати задане значення d , тобто коли накладається суворе обмеження $d_0 \leq d$, функцію $\text{round}(x)$ слід замінити функцією $\text{int}(x)$, що означає виділення цілої частини числа x (знаходження найближчого цілого, яке не перевищує x).

Шукане значення кроку решітки знаходиться підстановкою (9) у (8):

$$d_0 = \text{round}\left(\frac{Nd \sin \theta_0}{\lambda}\right) \frac{\lambda}{N \sin \theta_0}. \quad (10)$$

Розглянемо рівняння (5) для багатоелементної АР, тобто для АР з $M \gg 1$. Його можна записати у вигляді:

$$\sum_{n=-M}^M A_n \cos(nkd_0 \sin \theta_0) \Delta n = 0, \quad (11)$$

де $\Delta n = n - (n-1) = 1$.

Ліва частина (11) при $\Delta n \ll M$, тобто при $M \gg 1$, є наближеним записом інтеграла

$$\int_{-M}^M A(n) \cos(nkd_0 \sin \theta_0) dn = 0, \quad (12)$$

який переходить в строгу рівність при $M \rightarrow \infty$ [4], бо граничному переходу $\Delta n \rightarrow 0$ при фіксованому значенні M еквівалентний граничний перехід $M \rightarrow \infty$ при фіксованому значенні Δn . Перехід від (11) до (12) відповідає заміні дискретного розподілу неперервним, тобто ми замінюємо АР еквівалентним неперервним випромінювачем, що цілком прийнятно, якщо відстань між елементами АР d у багато разів менша за довжину АР $L = 2Md$: $d \ll 2Md$, $M \gg 1$.

Таким чином, для багатоелементної АР рівняння (5) може бути замінено рівнянням (12). Інтеграл в (12) для розподілів, що використовуються на практиці, може бути виражений через елементарні функції, в результаті чого у деяких випадках отримуємо рівняння, що дозволяє знайти аналітичний вираз для d_0 . В інших випадках отримуємо трансцендентне рівняння, яке все ж таки доводиться розв'язувати чисельними методами, однак отримане рівняння є значно простішим, ніж вихідне трансцендентне (5).

Наведемо результати розв'язання рівняння (12) для найбільш поширених на практиці амплітудних розподілів. Відзначимо, що застосування рівняння (12) до рівномірного розподілу із зауваженням, що при $M \gg 1$ $N = 2M + 1 \approx 2M$, призводить до розв'язку (8).

1. Амплітудний розподіл "косинус на п'єдесталі": $A_n = \Delta + (1 - \Delta) \cos\left(\frac{n\pi}{2M}\right)$.

В результаті отримуємо таке трансцендентне рівняння:

$$\Delta \frac{\sin(Mkd_0 \sin \theta_0)}{kd_0 \sin \theta_0} + (1 - \Delta) \frac{\pi}{2M} \frac{\cos(Mkd_0 \sin \theta_0)}{(\pi/2M)^2 - (kd_0 \sin \theta_0)^2} = 0, \quad (13)$$

що при $\Delta = 0$ (косинусоїдний розподіл) має аналітичний розв'язок:

$$d_0 = \frac{\pi\left(m + \frac{1}{2}\right)}{Mk \sin \theta_0} = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda}{2M \sin \theta_0}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

Значення d_0 , найближче до заданого d , розраховується за формулою:

$$d_0 = \left[\text{round}\left(\frac{2Md \sin \theta_0}{\lambda} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} \right] \frac{\lambda}{2M \sin \theta_0}. \quad (15)$$

2. Амплітудний розподіл "косинус-квадрат на п'єдесталі": $A_n = \Delta + (1 - \Delta) \cos^2\left(\frac{n\pi}{2M}\right)$.

Розв'язками рівняння є:

$$d_0 = \frac{\pi m}{Mk \sin \theta_0} = \frac{m\lambda}{2M \sin \theta_0}, \quad m = 2, 3, \dots \quad (16)$$

та

$$d_0 = \frac{\pi}{Mk \sin \theta_0} \sqrt{\frac{1+\Delta}{2\Delta}} = \frac{\lambda}{2M \sin \theta_0} \sqrt{\frac{1+\Delta}{2\Delta}},$$

однак практичну цінність має лише розв'язок (16), бо інший дає надто малі значення d_0 , які на практиці не використовуються.

Значення d_0 , найближче до заданого d , розраховується за формулою:

$$d_0 = \text{round}\left(\frac{2Md \sin \theta_0}{\lambda}\right) \frac{\lambda}{2M \sin \theta_0}. \quad (17)$$

Результати розрахунків свідчать, що формули (16)–(17) є точними при $\Delta = 0$. При $\Delta > 0$ більш точними є формули, що отримані у припущенні $N \approx 2M$:

$$d_0 = \frac{2\pi m}{Nk \sin \theta_0} = \frac{m\lambda}{N \sin \theta_0}; \tag{18}$$

$$d_0 = \text{round}\left(\frac{Nd \sin \theta_0}{\lambda}\right) \frac{\lambda}{N \sin \theta_0}. \tag{19}$$

3. Амплітудний розподіл “парабола на п’єдесталі”: $A_n = \Delta + (1 - \Delta)\left(\frac{n}{M}\right)^2$.

Результатом є трансцендентне рівняння

$$\sin(Mkd_0 \sin \theta_0) \left[\Delta + \frac{2(1 - \Delta)}{(Mkd_0 \sin \theta_0)^2} \right] - 2(1 - \Delta) \frac{\cos(Mkd_0 \sin \theta_0)}{Mkd_0 \sin \theta_0} = 0, \tag{20}$$

яке при $\Delta = 0$ (параболічний розподіл) набуває вигляду:

$$\text{tg}(Mkd_0 \sin \theta_0) = Mkd_0 \sin \theta_0. \tag{21}$$

4. Трикутний амплітудний розподіл: $A_n = 1 - \left|\frac{n}{M}\right|$.

Розв’язком є

$$d_0 = \frac{2\pi m}{Mk \sin \theta_0} = \frac{m\lambda}{M \sin \theta_0}, \quad m = 1, 2, \dots \tag{22}$$

Значення d_0 , найближче до заданого d , таке:

$$d_0 = \text{round}\left(\frac{Md \sin \theta_0}{\lambda}\right) \frac{\lambda}{M \sin \theta_0}. \tag{23}$$

Практика розрахунків свідчить, що отримані для багатоеlementних АР з різними розподілами трансцендентні рівняння та їх розв’язки є точними лише для “чистих” амплітудних розподілів (без п’єдесталу), тобто при $\Delta = 0$. Як вже зазначалося, при $\Delta > 0$ точнішими є співвідношення, отримані у припущенні $N \approx 2M$, тобто при $\Delta > 0$ у всі співвідношення замість M треба вводити $N/2$.

Результати розрахунків необхідного для формування нуля у напрямі $\theta_0 = 34^\circ$ кроку решітки d_0 при різних типах амплітудного розподілу та кількості елементів АР зведені у табл. 1. Шукалося значення d_0 , яке було б найближче до $d = 0,5\lambda$, але не перевищувало його: $d_0 \leq d = 0,5\lambda$.

Таблиця 1

	$F_\Sigma(\theta_0)^*$ при $M = 10$	$F_\Sigma(\theta_0)^*$ при $M = 50$	$F_\Sigma(\theta_0)^*$ при $M = 100$	$F_\Sigma(\theta_0)^*$ при $M = 500$	$\frac{d_0}{\lambda}$	Δ	Тип розподілу	Розрахункова формула			
при d	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	0,425784	-	рівномірний	(8)			
при d_0	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,495764 0,498231 0,498435						
при d	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,491780				0	косинусоїдний	(14)
при d_0	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	0,491780 0,496251 0,499828						
при d	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	0,445172	0,1	косинусоїдний	(13) при $M = N/2$			
при d_0	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-7}$	0,496661 0,498458 0,498444						
при d	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	0,431541	0,3	косинусоїдний	(13) при $M = N/2$			
при d_0	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	0,495982 0,498285 0,498437						

Закінчення таблиці 1

	$F_{\Sigma}(\theta_0)^*$ при $M = 10$	$F_{\Sigma}(\theta_0)^*$ при $M = 50$	$F_{\Sigma}(\theta_0)^*$ при $M = 100$	$F_{\Sigma}(\theta_0)^*$ при $M = 500$	$\frac{d_0^{**}}{\lambda}$	Δ	Тип роз- поділу	Розрахун- кова фор- мула																																																																																																												
при d	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,428495 0,495865 0,498256 0,498436	0,5	косину- соїдний	(13) при $M = N/2$																																																																																																												
при d_0	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$					при d	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,447073 0,482839 0,491780 0,498933	0	косинус- квадрат	(16)	при d_0	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	при d	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,1	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	при d	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,3	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,5	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	при d	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,490129 0,491714 0,496235 0,499827	0	парабо- лічний	(21)	при d_0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0
при d	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,447073 0,482839 0,491780 0,498933	0	косинус- квадрат	(16)																																																																																																												
при d_0	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$5,9 \cdot 10^{-10}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$					при d	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,1	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	при d	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,3	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,5	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	при d	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,490129 0,491714 0,496235 0,499827	0	парабо- лічний	(21)	при d_0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$										
при d	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,1	косинус- квадрат	(18)																																																																																																												
при d_0	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$					при d	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,3	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,5	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	при d	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,490129 0,491714 0,496235 0,499827	0	парабо- лічний	(21)	при d_0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																								
при d	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,3	косинус- квадрат	(18)																																																																																																												
при d_0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^{-7}$					при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,5	косинус- квадрат	(18)	при d_0	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	при d	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,490129 0,491714 0,496235 0,499827	0	парабо- лічний	(21)	при d_0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																																						
при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	0,425784 0,495764 0,498231 0,498435	0,5	косинус- квадрат	(18)																																																																																																												
при d_0	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$					при d	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,490129 0,491714 0,496235 0,499827	0	парабо- лічний	(21)	при d_0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																																																				
при d	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,490129 0,491714 0,496235 0,499827	0	парабо- лічний	(21)																																																																																																												
при d_0	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$					при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																																																																		
при d	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,429163 0,495892 0,498263 0,498436	0,5	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$																																																																																																												
при d_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$					при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$	при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																																																																																
при d	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	0,426643 0,495796 0,498239 0,498435	0,8	парабо- лічний	(20) при $M = N/2$																																																																																																												
при d_0	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$					при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)	при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																																																																																														
при d	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,357658 0,464956 0,482839 0,497145	-	трикут- ний	(22)																																																																																																												
при d_0	$8,4 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$																																																																																																																

* $F_{\Sigma}(\theta_0)$ – значення нормованої ДН в напрямі θ_0 .

** Чотири значення d_0 відповідають кількості елементів $M = 10, 50, 100$ та 500 .

З таблиці видно, що, хоча всі співвідношення для багатоеlementних АР виводились у припущенні та кількість елементів АР набагато більша за одиницю, вони залишаються вірними з високою точністю й при малих значеннях M , тобто і для малоелементних АР. Особливо це стосується “чистих” амплітудних розподілів.

На рис. 3 наведена ДН множника 21-елементної решітки при d_0 , розрахованому для формування нуля в напрямі $\theta_0 = 25,5^\circ$. При цьому крок решітки d_0 вибирався найближчим до $d = 0,5\lambda$ при умові $d_0 \leq d$. Амплітудний розподіл рівномірний. На рис. 4 аналогічно продемонстрована можливість обранням відповідного d_0 подавити осьовий прийом лінійної АР (у напрямі $\theta_0 = 90^\circ$). З графіків видно, що формування нуля у заданому напрямі супроводжується незначною зміною ширини головної пелюстки та зовсім не супроводжується (на відміну від описаного на початку статті методу) зсувом головного максимуму ДН відносно напрямку прийому. Незмінним залишається також і коефіцієнт використання поверхні АР.

Деяким недоліком запропонованого способу формування нулів ДН АР є те, що мінімум ДН (нуль) є гострим, причому, чим ближче нуль розташований до головної пелюстки, тим він гос-

тріший. В результаті, при малих відхиленнях кроку решітки від необхідного значення d_0 , відбувається значне відхилення нуля ДН від необхідного напрямку. Однак на практиці завада розподілена у вузькому секторі кутів біля θ_0 , тому, навіть при зсуві нуля ДН відносно θ_0 , вона значно послаблюється.

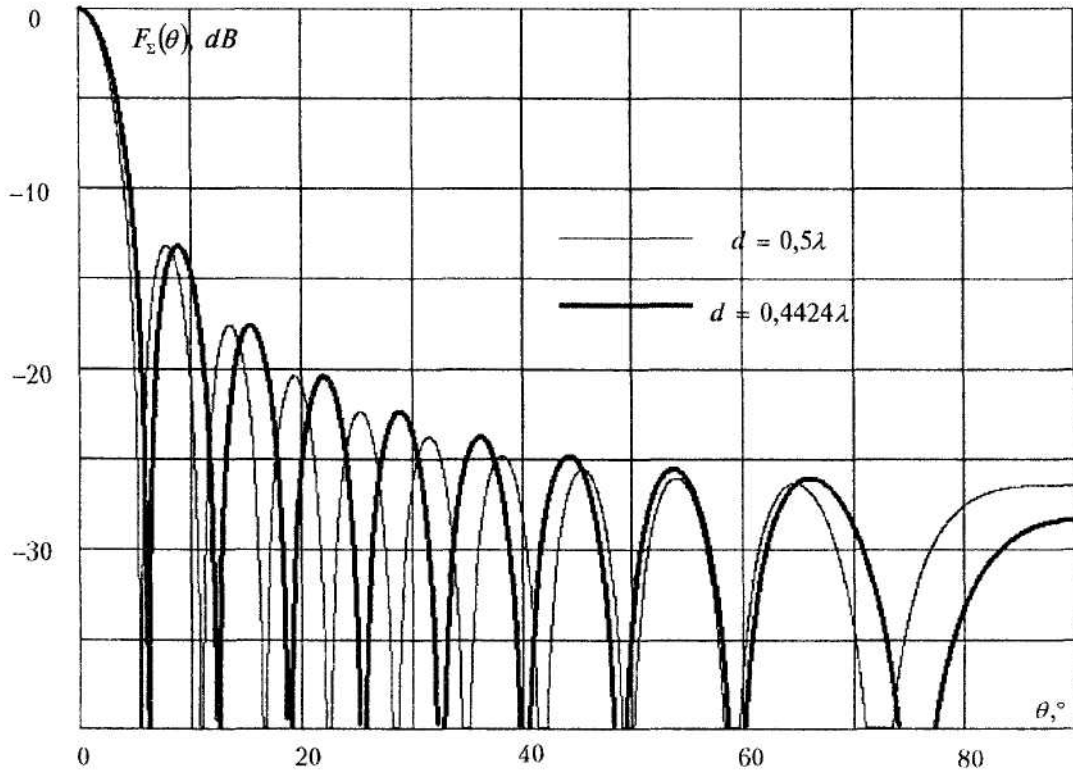


Рис. 3

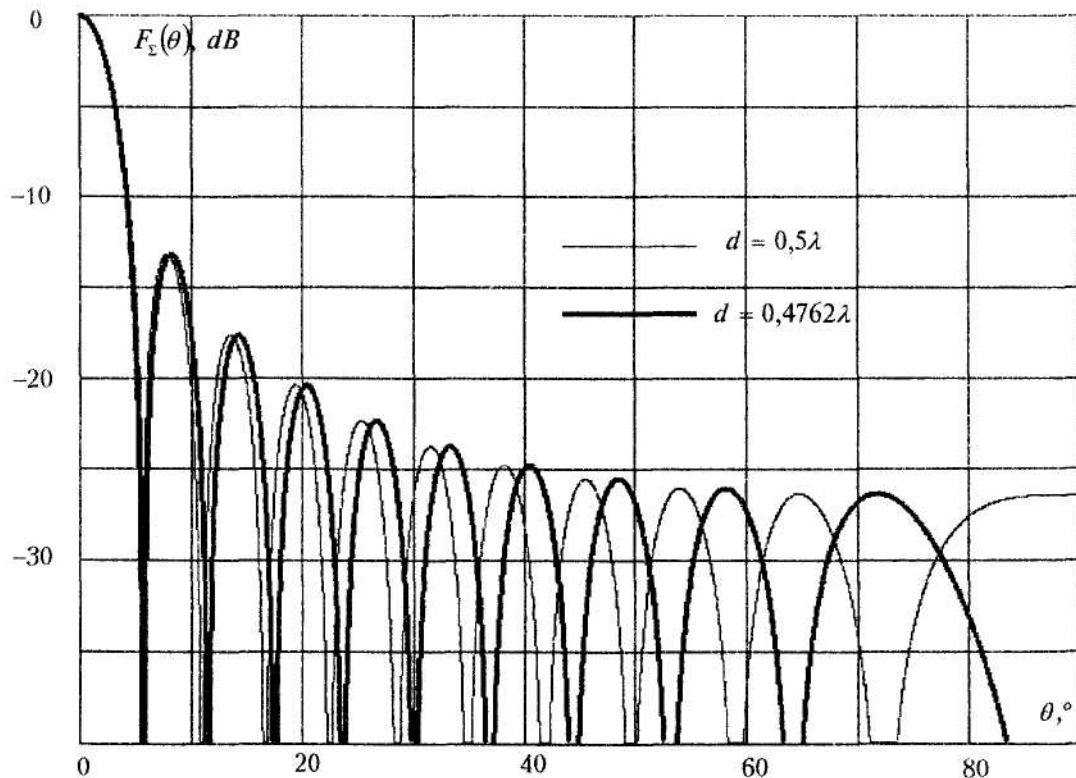


Рис. 4

У багатьох випадках напрям приходу завади θ_0 змінюється у часі, через що постає задача оперативного регулювання напрямку нульового прийому. Однак в АР змінювати крок між елементами, з метою регулювання положення нуля ДН, неможливо через технічну складність. Зрозуміло, що замість цього слід змінювати який-небудь електричний параметр. З (2) бачимо, що таким параметром може бути частота, так як у формулу (2) входить добуток

$$kd = \frac{2\pi}{\lambda} d = \frac{2\pi f}{c} d = \frac{\omega}{c} d. \quad (24)$$

Зміні кроку решітки з d до d_0 буде еквівалентна зміна частоти з f до f_0 , що визначається з умови:

$$\frac{2\pi f}{c} d_0 = \frac{2\pi f_0}{c} d. \quad (25)$$

Звідки: $f_0 = f \frac{d_0}{d}, \Delta f_0 = f \left(\frac{d_0}{d} - 1 \right), \frac{\Delta f_0}{f} = \frac{d_0}{d} - 1. \quad (26)$

Виходячи з даних табл. 1, можна відзначити, що відносна зміна частоти, яка необхідна для формування нуля ДН АР в заданому напрямі, становить від декількох десятків відсотків при $M = 10$ до декількох відсотків при $M = 100$.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Дробкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио, 1974.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. – М.: Энергия, 1975.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. Т. 2. – М.: Наука, 1985.
4. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. Т. 1. – М.: Наука, 1985.

БЛОЦЬКИЙ Андрій Іванович – аспірант кафедри медичних приладів та систем Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- технічна електродинаміка;
- пристрої НВЧ та антени.

Подано 15.12.1999.