

Фільтрація ближнього поля системи взаємодіючих випромінювачів

В.П. Савчук, І.М. Глушко

Одеський Державний Політехнічний Університет

м. Одеса, пр. Шевченка, 1, тел. 22-34-74

E. mail: postmaster@opi.odessa.ua

Розглядається задача фільтрації ближнього поля багатоелементної випромінюючої антени, елементи якої взаємодіють по полю, що випромінюється. Метод фільтрації заснований на корекції амплітудного розподілу коливальних швидкостей елементів антени. Представлений рекурсивний алгоритм, що використовує багатомірну параметричну ідентифікацію оператора взаємодії випромінювачів.

ВСТУП

Випромінюючі антени Тротта дозволяють створити в своєму ближньому полі умови, аналогічні полю плоскої хвилі, що біжить. Такі антени застосовуються як в метрології, так і для рішення задач дефектоскопії і діагностики. Конструктивно антена Тротта являє собою m лінійно розташованих груп випромінювачів, кожна з яких складається з n рознесених на рівну відстань випромінювачів. Кожна група здвинута відносно сусідньої групи на відстань d , рівну відстані між окремими випромінювачами. Амплітудний розподіл в апертурі кожної групи має біноміальний характер. Діаграма спрямованості антени Тротта виражається наступною функцією кута θ :

$$D(\theta) = \frac{\sin(m \cdot \varphi)}{m \cdot \sin(\varphi)} \cdot \cos^n(\varphi), \quad (1)$$

де $\varphi = \pi \cdot \lambda / d \cdot \sin \theta$, λ — довжина хвилі.

Така форма діаграми дозволяє отримати в ближньому полі антени умови, відповідні плоскій хвилі, що біжить. Однак, якщо випромінювачі взаємодіють по полю, що випромінюється, то амплітудний розподіл на стороні управління не буде співпадати з розподілом на стороні випромінювання. У цьому випадку у діаграмі з'являються далекі бічні пелюстки, а ближнє поле стає неоднорідним. Усунути неоднорідність ближнього поля можна за допомогою коректуючого амплітудного розподілу на стороні управління. Корекція розподілу еквівалентна включенню просторового фільтра, що усуває неоднорідність ближнього поля [1].

1. АЛГОРИТМ ФІЛЬТРАЦІЇ

Зв'язок нормальної складаючої коливальної швидкості v_n випромінювача з номером n і напруги u_m , що підводиться до випромінювача з номером m , визначається як:

$$u_m = \sum_{n=1}^N z_{mn} \cdot v_n, \quad m = 1, \dots, N, \quad (2)$$

де N — число елементів решітки; z_{mn} — взаємний опір випромінювання перетворювачів з номерами m і n (при $m \neq n$) або власний, включаючи механічний, опір випромінювання перетворювача з номером m (при $m = n$).

Будемо розглядати сукупність швидкостей v_n як вектор \mathbf{v} величин, що спостерігаються з деякою похибкою, а сукупність напружень u_m — як вектор керуючих впливів. Тоді рішення системи рівнянь (2) відносно швидкостей можна записати у вигляді:

$$\mathbf{v} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

де $\mathbf{B} = \mathbf{Z}^{-1}$ — матриця коефіцієнтів взаємного впливу елементів решітки; \mathbf{Z} матриця власних і взаємних опорів; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — вектор, характеризуючий похибку вимірювання швидкості.

Якщо опори випромінювання не відомі, то співвідношення (3) являє собою систему багатомірних рівнянь регресії вектора швидкостей, що спостерігаються по вектору \mathbf{u} вхідних впливів з матрицею \mathbf{B} невідомих параметрів [2]. Матрицю \mathbf{B} можна ідентифікувати, якщо виміряти J векторів $\mathbf{v}(j)$ (j — номер поточного вимірювання) для заданих впливів $\mathbf{u}(j)$. В тому випадку, коли компоненти вектора некоррельовані і розподілені згідно з нормальним законом, критерій якості оцінки \mathbf{B} у відповідність з методом найменших квадратів можна представити у вигляді:

$$Q_n(J) = \sum_{j=1}^J q_j \cdot [v_n(j) - \tilde{\mathbf{b}}_n(j) \cdot \mathbf{u}(j)]^2, \quad (4)$$

де n — номер випромінювача; $v_n(j)$ — його коливальна швидкість; q_j — довільний ваговий коефіцієнт; $\tilde{\mathbf{b}}_n(j)$ — оцінка рядка з номером n матриці \mathbf{B} на кроці j .

Рішення системи нормальних рівнянь

$$\frac{\partial Q_n}{\partial \tilde{\mathbf{b}}_n} = 0, \quad n = 1, \dots, N$$

відносно $\tilde{\mathbf{b}}_n(j)$ мінімізує критерій (4) і дає оптимальну оцінку $\tilde{\mathbf{B}}$ матриці \mathbf{B} на кожному кроці j . Це рішення можна представити у вигляді процесу послідовних ітерацій [3]:

$$\tilde{\mathbf{b}}_n(j) = \tilde{\mathbf{b}}_n(j-1) + q_j \cdot \Gamma(j) \cdot \mathbf{u}(j) \cdot \Delta v_n, \quad (5)$$

де

$$\Delta v_n = [v_n(j) - \tilde{\mathbf{b}}_n(j-1) \cdot \mathbf{u}(j)],$$

$$\Gamma(j) = \Gamma(j-1) - q_j \cdot \Delta \Gamma(j-1),$$

$$\Delta \Gamma(j-1) = \frac{\Gamma(j-1) \cdot \mathbf{u}(j) \cdot \mathbf{u}^T(j) \cdot \Gamma(j-1)}{1 + q_j \cdot \mathbf{u}^T(j) \cdot \Gamma(j-1) \cdot \mathbf{u}(j)},$$

Γ — знак транспонування.

Для побудови просторового фільтра ближнього поля антени до процедури ідентифікації, заданої співвідношенням (5), необхідно приєднати рівняння послідовного управління амплітудним розподілом коливальних швидкостей в апертурі антени:

$$\mathbf{u}(j) = \tilde{\mathbf{B}}^{-1}(j) \cdot \mathbf{w}, \quad (6)$$

де \mathbf{w} — амплітудний розподіл швидкостей в апертурі антени, що забезпечує необхідні властивості її ближнього поля.

Процес формування амплітудного розподілу складається з двох етапів. На першому етапі по заданому вектору вхідних впливів на електричній стороні випромінювачів і вектору швидкостей, що спостерігається на їх акустичній стороні, оцінюються коефіцієнти регресії відгуку по вектору впливів. На другому етапі будується вектор збудження, що є вхідним для наступного кроку ідентифікації.

Початкові умови для розглянутого процесу можна записати у вигляді:

$$\mathbf{B}(0) = \mathbf{I}, \quad \mathbf{u}(0) = \beta \cdot \mathbf{w}, \quad \Gamma(0) = \alpha \cdot \mathbf{I}, \quad (7)$$

де \mathbf{I} — одинична матриця, $\alpha, \beta = const, \alpha \gg 1$.

Процес завершується при умові:

$$\|\mathbf{w} - \mathbf{v}(j)\| < \mu, \quad (8)$$

де $\|\cdot\|$ — норма вектора, μ — константа, яка характеризує точність формування амплітудного розподілу.

2. Результати моделювання

У цьому розділі приведені результати моделювання процесу формування ближнього поля для

одновимірних антен Тротта при різних видах взаємного зв'язку їх елементів (мал. 1).

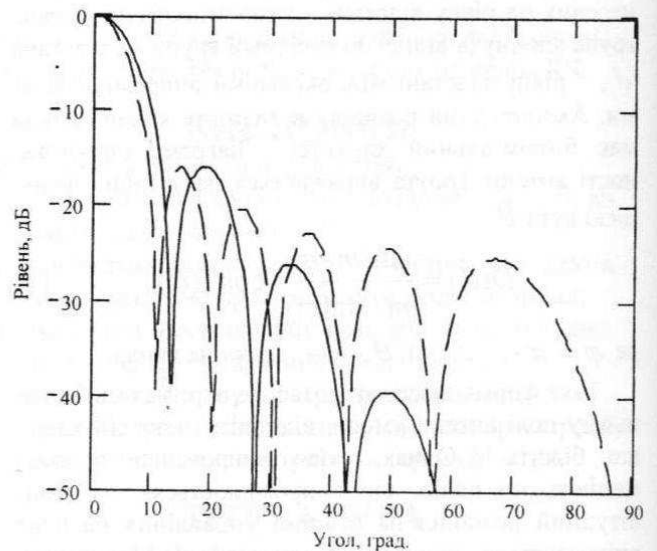


Мал. 1. Залежність коефіцієнтів взаємного впливу від різниці номерів елементів для різної міри зв'язку:

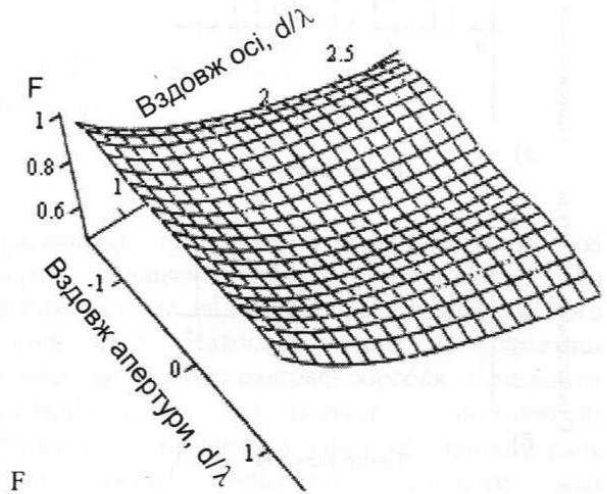
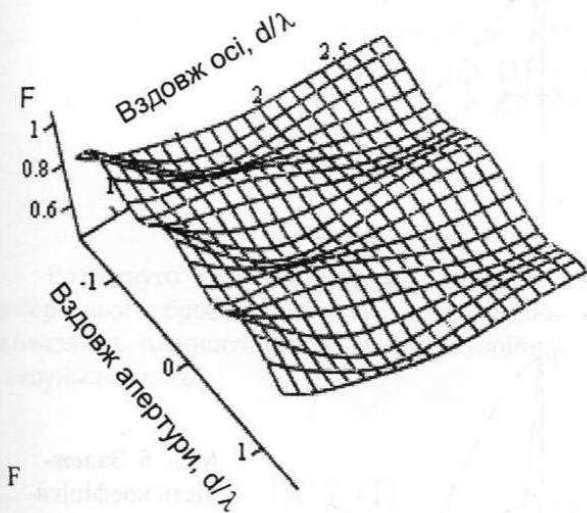
— сильний;
--- середній;
- - - слабкий.

На мал. 2 показані діаграми спрямованості лінійної антени з сильно зв'язаними елементами. Число елементів антени $N = 15$ ($n = 5, m = 11$), відстань між ними $d = 0.4 \cdot \lambda$, λ — довжина хвилі, що випромінюється. Для формування рівномірного розподілу тиску в ближньому полі використано п'ять кроків корекції. На мал. 3 представлена структура ближнього поля, а на мал. 4 приведені лінії постійного рівня відносного тиску в ближньому полі. Ці малюнки показують, що для отримання однорідного ближнього поля необхідно усунути в діаграмі спрямованості далекі по куту бічні пелюстки.

Мал. 2. Діаграма спрямованості:



На мал. 5а приведений амплітудний розподіл Тротта на стороні випромінювання, який забезпечує необхідну структуру ближнього поля. На мал. 5б показаний розподіл, який виходить через взаємний вплив випромінювачів на стороні випромінювання, якщо на стороні збудження введений розподіл Тротта. На мал. 5в показаний отриманий внаслідок корекції розподіл на стороні збудження, який забезпечує розподіл Тротта на стороні випромінювання при даному взаємозв'язку елементів.

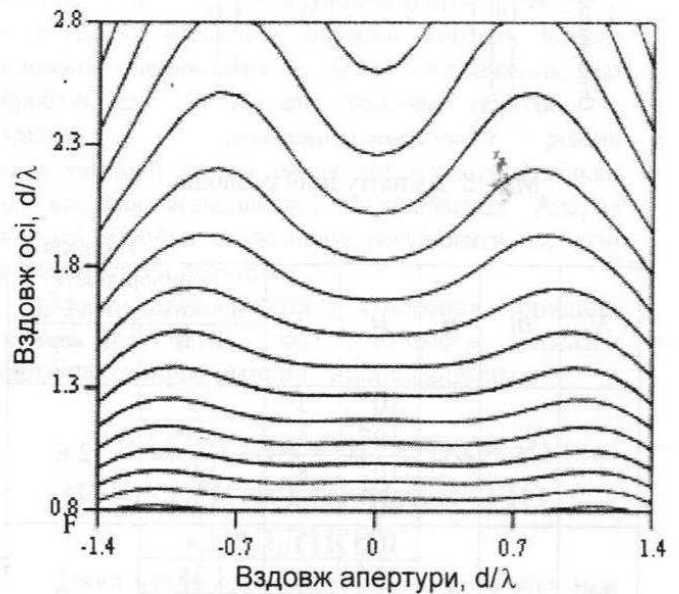
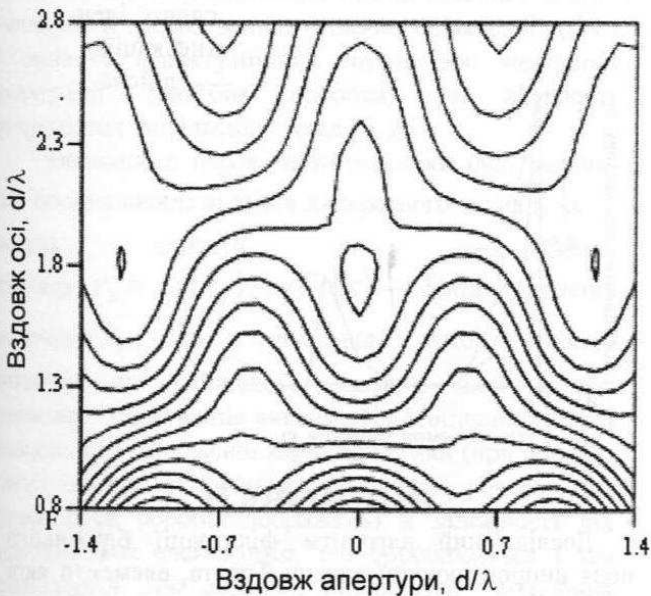


а)

б)

Мал. 3. Близьке поле:

а) --- до корекції; б) — після корекції.



а)

б)

Мал. 4.. Лінії рівня відносного тиску в близькому полі:

а) --- до корекції; б) — після корекції.

Процес формування однорідного близького поля завершується за число кроків, менше ніж число елементів антени. Але ідентифікація матриці взаємозв'язку завершується не повністю. Це говорить про те, що має місце неоднозначний зв'язок між зміною структури близького поля і коефіцієнтами взаємного впливу випромінювачів антени.

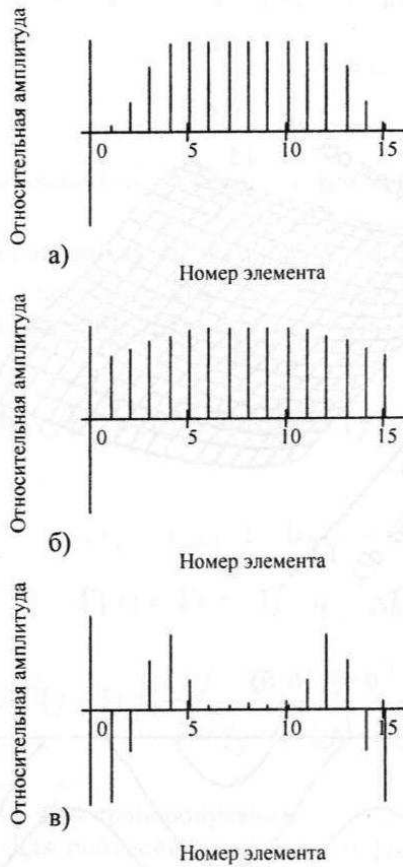
На мал. 6 показана залежність дійсних коефіцієнтів взаємного впливу і коефіцієнтів, отриманих в процес ідентифікації, від відстані між взаємодіючими елементами. Аналогічні результати отримані для інших антен Тротта.

Результати моделювання представлені в таблиці 1, де визначено: N — число випромінювачів; m —

число груп; n — число в групі; $\mu = \frac{|\mathbf{w} - \mathbf{v}|^2}{|\mathbf{w}| \cdot |\mathbf{v}|}$ —

похибка корекції; J — число кроків корекції.

Для аналізу впливу похибки вимірювання коливальної швидкості на стороні випромінювання проведено моделювання процесу фільтрації близького поля методом Монте-Карло. Результати моделювання показують, що із зростанням похибки вимірювання швидкості при фіксованому значенні точності корекції зростає як середнє число ітерацій, так і його варіація. Наприклад, для 29-елементної антени при точності корекції $\mu = 0.01$ дані моделювання представлені в таблиці 2.



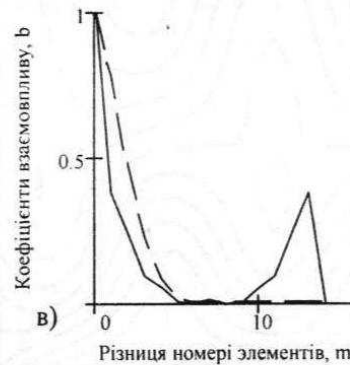
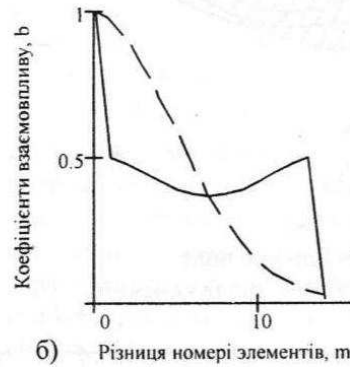
Мал. 5. Амплітудний розподіл

Таблиця 1.

N	m	n	μ	J	Неоднорідність ближнього поля, дБ	
					Після корекції	До корекції
9	5	5	10^{-2}	3	1.9	2.6
			10^{-4}	4	1.9	
			10^{-7}	8	1.9	
			10^{-8}	9	1.9	
11	7	5	10^{-2}	3	1.4	2.6
			10^{-4}	4	1.35	
			10^{-7}	16	1.3	
			10^{-8}	19	1.3	
15	11	5	10^{-2}	3	2.0	3.2
			10^{-4}	5	1.8	
			10^{-7}	9	1.8	
			10^{-8}	36	1.8	
29	23	7	10^{-2}	4	1.8	3.5
			10^{-4}	6	1.6	
			10^{-7}	12	1.6	
			10^{-8}	14	1.6	

Таблиця 2.

Пхибка вимірювання (СКО)	Число ітерацій			
	Середнє	Мин.	Макс.	СКО
0.3	6	5	8	0.6
0.4	7	6	9	0.65
0.5	8	6	11	1.1
0.6	9	6	16	1.5



Мал. 6. Залежність коефіцієнтів взаємного впливу від різниці номерів елементів:
— отримана внаслідок ідентифікації;
--- дійсна.

ВИСНОВКИ

Досліджений алгоритм фільтрації ближнього поля випромінюючої антени Тротта, елементи якої взаємодіють по полю, що випромінюється. Процес корекції амплітудного розподілу в апертурі антени сходиться до бажаного розподілу значно швидше, ніж ідентифікація матриці коефіцієнтів взаємного впливу. Це говорить про те, що має місце неоднозначний зв'язок між зміною структури ближнього поля і коефіцієнтами взаємного впливу випромінювачів антени. Із зростанням похибки вимірювання швидкості при фіксованій точності корекції зростає число кроків корекції.

ЛІТЕРАТУРА

- Зверев В. А. "Радиооптика". — М.: Радио и связь, 1975. — 304 с.
- Гроп Д. "Методы идентификации систем". — М.: Мир, 1979. — 302 с.
- Изерман Р. "Цифровые системы управления". — М.: Мир, 1984. — 542 с.