

УДК 629.396

Е.О. Ковалевський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

## КОМПЕНСАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ПОХИБОК ДІАГРАМОУТВОРЕННЯ АДАПТИВНИХ АНТЕН

НАУ, кафедра аеронавігаційних систем  
E-mail: kovalevskiy@ukr.net

*Розглянуто вплив інструментальних похибок діаграмоутворення на ефективність адаптивних антен. Запропоновано способи компенсації похибок. Наведено результати моделювання варіантів компенсації.*

*The influence of instrumental errors on beam formation of adaptive arrays is investigated. The ways of error reduction are proposed and the simulation results are given.*

### Постановка проблеми

Діючим способом підвищення завадостійкості апаратури, особливо супутникової радіонавігації, є застосування адаптивних антен (АА) [1; 2], які дозволяють формувати провали в діаграмі направленості антени в напрямках приходу завад у результаті аналізу сигнально-завадової обстановки. Ефективність заглушення завад АА визначається двома основними факторами:

- оптимальністю алгоритму адаптації;
- забезпеченням необхідних характеристик при апаратурній реалізації.

Неідеальність характеристик діаграмоутворювальних елементів АА при будь-яких алгоритмах адаптації суттєво знижує показник заглушення завад. У літературі з розробки АА немає достатніх даних для вирішення цієї проблеми. Це обумовлює необхідність пошуку способів компенсації інструментальних похибок.

### Обумовлення способу компенсації

Основними складовими частинами АА є (рис. 1):

- антенна решітка (АР);
- діаграмоутворювальні елементи;
- блок адаптації;
- суматор.

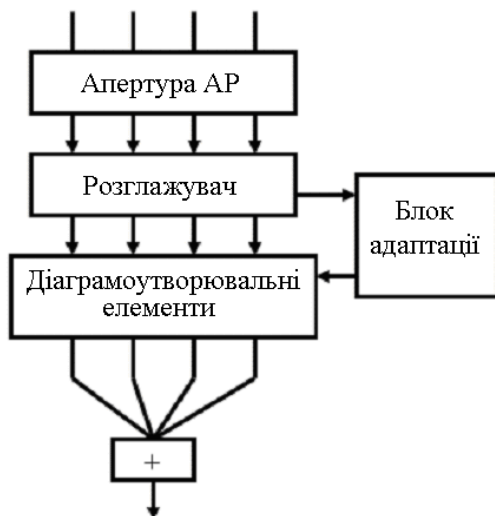


Рис. 1. Структурна схема АА

Розглянемо вираз для діаграми направленості АА з лінійною АР:

$$D(\alpha) = \left| \sum_{k=0}^{N-1} \dot{W}_k e^{-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha \cdot k} \right|,$$

де  $\alpha$  – кут прийому сигналу;  $N$  – кількість елементів АР;  $\dot{W}_k$  – комплексний ваговий коефіцієнт  $k$ -го каналу;  $d$  – крок еквідистантної АР;  $\lambda$  – довжина хвилі прийнятого сигналу.

При оптимальному розрахунку вектора вагових коефіцієнтів  $W$  та ідеальній їх реалізації в напрямку приходу завади  $\alpha = \theta$  у діаграмі направленості формується провал.

Інструментальні похибки  $d\dot{W}_k$  діаграмоутворювальних елементів приведуть до деформації діаграми направленості та погіршення придушення завади

$$\sim D(\theta) \left| \sum_{k=0}^{N-1} \left( \dot{W}_k + d\dot{W}_k \right) e^{-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \cdot k} \right|. \quad (1)$$

Аналіз виразу (1) та алгоритм формування вагового коефіцієнта  $W$  [3; 4] показує, що автоматизувати компенсацію викривлень  $d\dot{W}_k$  неможливо.

Для пошуку способів компенсації проаналізуємо характеристики широко використовуваних як діаграмоутворювальні елементи вектор-модуляторів (ВМ) [5]. Під впливом керуючих напруг у ВМ установлюється комплексний коефіцієнт передачі каналу АР, відповідний до значення нормованого вагового коефіцієнта  $\dot{W}_k$ :

$$\dot{K}_k = K_k e^{j\varphi_k}.$$

З аналізу характеристик випливає, що як модуль  $K_k$ , так і аргумент  $\varphi_k$  коефіцієнта передачі мають відхилення від нормальних величин:

$$dK_k = dW_k = K_k - \left| \dot{W}_k \right|,$$

$$d\varphi_k = \varphi_k - \arg(\dot{W}_k).$$

Відхилення залежить від фази

$$\begin{aligned} dK_k &= F_k(\varphi_k); \\ d\varphi_k &= F_\varphi(\varphi_k), \end{aligned} \quad (2)$$

де функції  $F_k$  та  $F_\varphi$  різні для фіксованих значень  $K_k = \text{const}$ .

Варіант 1. Для реалізації способу компенсації відхилень необхідно знати функції (2). Їх можна визначити апроксимацією експериментальних характеристик чи їх записом до таблиці у вигляді відліків.

Виникають проблеми вибору скінченного числа значень модуля  $K_k$  з континуума та визначення необхідної точності апроксимації. При реалізації способу компенсації відхилень необхідно викликати з пам'яті блока адаптації відліків

$$P_1 = 2N_k(C_1 + C_2),$$

де  $N_k$  – кількість дискретів за модулем  $K_k$ ;  $C_1$ ,  $C_2$  – кількість коефіцієнтів апроксимації функцій (2),

та провести відповідні обчислення поправок

$$d\dot{W}_k.$$

При  $N$  елементній АР кількість параметрів збільшується в  $N$  разів.

Варіант 2. Розглянемо спосіб, при якому функції (2) визначаються апроксимацією експериментальних характеристик ВМ для скінченного числа  $N_k$ , а компенсація похибок проводиться за однією вибраною з  $N_k$  більшості пари функцій:  $FO_k(\varphi_k)$  та  $FO_\varphi(\varphi_k)$ . При цьому кількість параметрів порівняно з  $P_1$  зменшується в  $N_k$  разів.

Варіант 3. Для адаптивних антен [4; 6], в яких вагові коефіцієнти розраховуються на основі визначення кутів приходу завад, пропонується інший спосіб компенсації інструментальних похибок.

Цей спосіб передбачає проведення робіт за допомогою імітатора амплітудно-фазових розподілень, який забезпечує подачу на виході розгалужувачів (рис. 1) сигналів несучої частоти.

Амплітуда та фаза сигналів відповідає заданому куту приходу завади  $\theta_3$ .

Апертура АР та суматор при цьому вимикаються.

У блоці адаптації обчислюються компоненти вектора  $W$  та через контур управління встановлюються коефіцієнти передачі  $\dot{K}_k$  діаграмоутворювальних елементів ВМ.

Установлені  $\dot{K}_k$  фіксуються на виходах вектор-модуляторів за допомогою стандартної виміральної апаратури.

Похибки обчислюються за формулою

$$d\dot{W}_k = \dot{W}_k - \dot{K}_k$$

та заносять до пам'яті блока адаптації.

Процедура повторюється для нового значення кута  $\theta_3$ . Треба вирішити, з яким шагом змінювати  $\theta_3$ .

У цьому разі враховуються не лише інструментальні похибки ВМ, але й похибки цифроаналогових перетворювачів в контурах управління.

Для вирішення задачі вибору варіанта компенсації проводимо моделювання.

### Математичне моделювання способів компенсації

Промодельємо компенсацію за варіантом 3. Математична модель функціонує згідно з блок-схемою (рис. 2, а).

Уводимо значення кутів приходу завади  $\theta_3$  та формуємо вихідні сигнали імітатора амплітудно-фазових розподілень у вигляді

$$\dot{U}_k = U_n \sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_3 k\right),$$

де  $U_n = \text{const}$ .

Задамо значення кутів приходу сигналів:

$$\alpha = [\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n]$$

і розрахуємо вагові коефіцієнти:

$$W = \varphi^{-1} B, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість сигналів;  $\varphi$  – матриця фазорів сигналів та завад;  $B$  – вектор з нульовим та одиничним значенням у завадових та сигнальних рядках системи рівнянь (3).

Залежно від значення кута  $\theta_3$  формуємо інструментальні похибки ВМ відповідно до виразів, отриманих у результаті апроксимації експериментальних характеристик:

$$dW_k = dK_k e^{jd\varphi_k};$$

$$dK_k = \frac{AK}{K_k} \sin(\tilde{\omega}1\varphi_k);$$

$$d\varphi_k = \frac{AF}{K_k} \sin(\tilde{\omega}2\varphi_k);$$

$$\varphi_k = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta k,$$

де  $AK$ ,  $AF$ ,  $\tilde{\omega}1$ ,  $\tilde{\omega}2$  – параметри, отримані при апроксимації.

Отримаємо вагові коефіцієнти з урахуванням інструментальних похибок

$$\tilde{W} = W + dW.$$

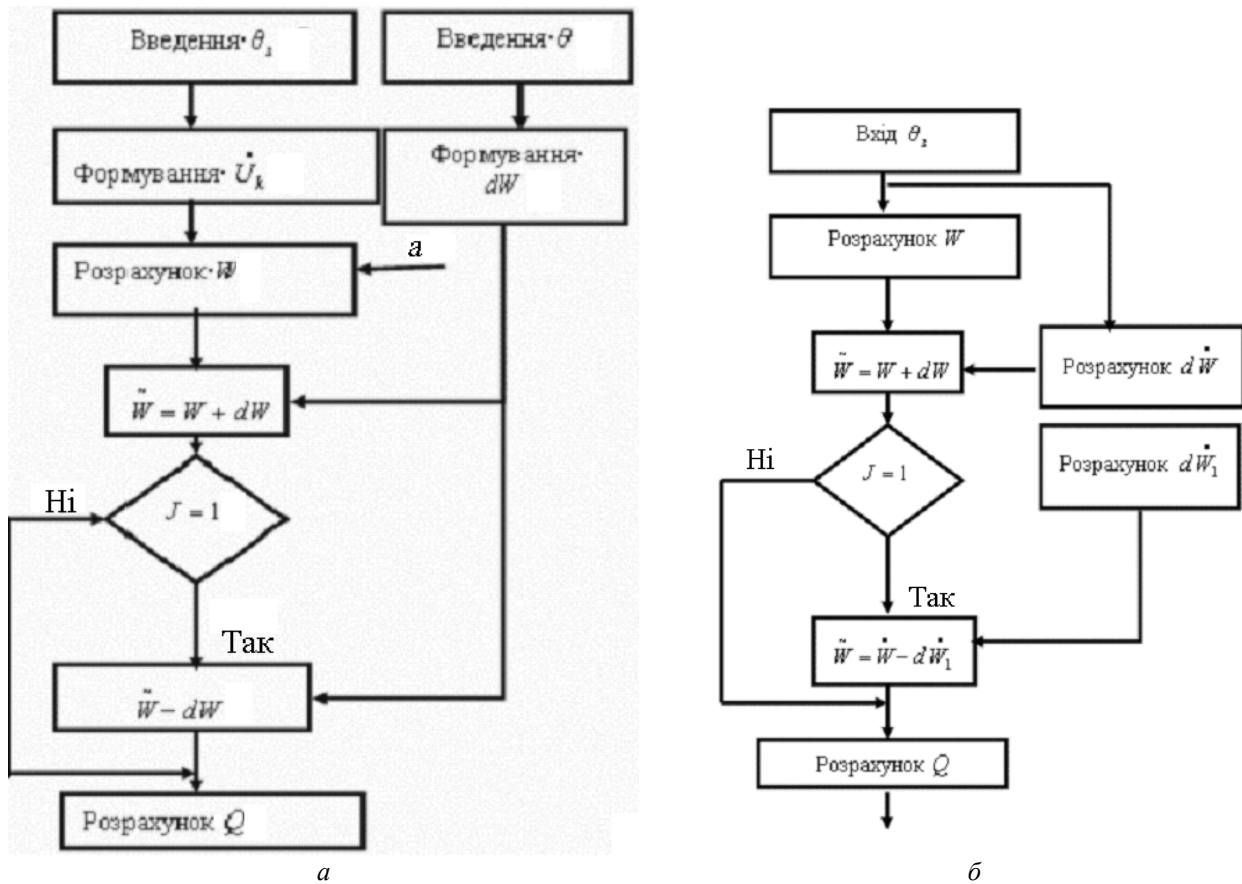


Рис. 2. Блок-схема алгоритму моделі:  
 а – варіант 3; б – варіант 2

Далі модель функціонує в двох режимах:  
 – з компенсацією похибок, якщо  $J = 1$ ;  
 – без компенсації, якщо  $J = 0$ .

Показник придушення завади розраховуємо за формулою

$$Q = 20 \lg \left[ \frac{D(\theta_3)}{D(\alpha)} \right].$$

Рівність кутів  $\theta_3 = \theta$  відповідає режиму повної компенсації, нерівність  $\theta_3 \neq \theta$  – наближеної.

Передбачено варіант роботи моделі без введення та компенсації похибок.

Моделювання проводилося при таких значеннях параметрів:

- $\theta = 43^\circ$ ;
- $\alpha_1 = 14^\circ$ ;
- $AK = 0,002$ ;
- $AF = 0,02$ ;
- $U_n = 1$ ;
- $N = 2$ ;
- $d = 0,5$ .

За відсутності інструментальних похибок показник придушення завад дорівнює  $Q = -45$  дБ.

При похибках з зазначеними параметрами:

$$Q = -20 \text{ дБ.}$$

Уведення компенсації зі змінною кутовою дискретністю

$$\Delta = \theta_3 - \theta$$

у межах  $10^\circ$  поліпшило показник придушення на 7–25 дБ. Якщо  $\Delta = 20^\circ$ , компенсація не проводиться.

Таким чином, відсутність режиму компенсації при інструментальних похибках ВМ призводить до зменшення показника придушення завади на 25 дБ.

При компенсації похибок якість функціонування АА підвищується до 25 дБ залежно від дискретності визначення поправок.

При цьому в пам'яті необхідно зберігати

$$P_2 = 2N \frac{S}{\Delta},$$

де  $N$  – кількість елементів АР;  $S$  – кутовий сектор прийому сигналів;  $\Delta$  – кутова дискретність запису поправок параметрів.

Для авіаційної апаратури застосовують мало-розмірні АР.

Сектор прийому сигналів GNSS дорівнює  $170^\circ$ .

Якщо  $\Delta = 5^\circ$  та  $N = 4$ , отримаємо

$$P_2 = 2 \cdot 4 \frac{170}{5} = 272 \text{ параметрів.}$$

Для плоскої АР кількість параметрів подвоюється. Моделювання способу компенсації за варіантом 2 проводимо відповідно з блок-схемою, показаною на рис. 2, б. Похибку  $d\dot{W}$  визначаємо за формулою апроксимації для відповідного змінного коефіцієнта  $K_k$ , а компенсаційну поправку  $dW_1$  за однією з вибраних. Як точні формули похибок використовуємо вирази (4) з параметрами:

$$AK = 0,002;$$

$$AF = 0,02;$$

$$\tilde{\omega}_1 = \frac{\pi}{6};$$

$$\tilde{\omega}_2 = \frac{\pi}{3}.$$

Формула для обчислення поправок відповідає виразу (4) при тих самих параметрах, але при  $K_k = 1$ . Результати моделювання наведено в таблиці. При такому способі компенсації інструментальних похибок вдається поліпшити показник придушення завад на 17 дБ.

#### Результати моделювання варіанта 2

$\theta_3$ , град	$Q$ , дБ		
	Без похибок	$J = 0$	$J = 1$
30	-47,90	-23,6	-39,81
43	-44,70	-20,7	-37,2
50	-43,7	-21,2	-38,3

#### Висновки

Інструментальні похибки типових діаграмоутворювальних елементів АА зумовлюють значне погіршення придушення завад.

У літературі немає рекомендацій з вирішення цієї проблеми.

Розглянуті способи компенсації цих похибок дозволяють поліпшити показник придушення.

Ступінь поліпшення залежить від наявності ресурсів пам'яті та швидкодії обчислювальної техніки.

Вибір варіанта компенсації залежить від особливостей АА.

#### Література

1. *Four-Element Adaptive Array Evolution for United States Navy Airborne Applications* / D. Williams, S. Clark, J. Cook et al. // ION GPS 2000, 19–22 September 2000, Salt Lake City, T. – P. 2523–2532.
2. *Гордиенко Д.Н.* Возможности использования адаптивных антенных решеток для повышения помехоустойчивости аппаратуры спутниковых радионавигационных систем // *Новости навигации. НЦ «Интернавигация» и РОИН.* – 2001. – №1. – С. 37–41.
3. *Адаптивная компенсация помех в каналах связи* / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
4. *Ковалевский Э.А.* Адаптивные антенно-приемные системы средств спутниковой аэронавигации // *Материали V Міжнар. конф. “Авіа-2003”*, 23–25 квіт. 2003. Т. 2. Аерокосмічні системи моніторингу та керування. – К.: НАУ, 2003. – С. 21.14–21.17.
5. *RF Vector Modulator AD8341* www.analog.com.
6. *Ковалевський Е.О.* Синтез адаптивної антенно-приймальної системи GNSS // *Вісн. НАУ.* – 2006. – №2. – С. 49 – 50.

Стаття надійшла до редакції 18.10.06.