

УДК 621.396.677

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

КОНФІГУРАЦІЯ АНТЕННИХ РЕШІТОК І ЕФЕКТИВНІСТЬ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ

Проаналізовано вплив параметрів антенних решіток на придушення завад адаптивною системою. Наведено результати моделювання.

The detailed analysis and simulation results are presented for the influence of aerial array parameters on the noise rejection in adaptive systems.

Вступ

Найбільш ефективним способом підвищити завадостійкість апаратури споживача СРНС є просторова обробка сигналів. Вона припускає використання в апаратурі антенних решіток (АР).

У монографії [1] розглянуто загальні теоретичні питання побудови адаптивних компенсаторів завад та наведено поширену бібліографію. Проте у літературних джерелах не акцентується увага на впливі конфігурації і параметрів АР на ефективність адаптивної системи. Завдяки багатоканальності АР є датчиком інформації про просторово-часові характеристики прийнятих сигналів, від побудови якого багато в чому залежить якість придушення завад.

У цій роботі аналізується ступінь залежності ефективності придушення завад від параметрів АР для адаптивної системи, коефіцієнти адаптації в якій обчислено за результатами вимірювання (обчислення) кутів надходження завад та навігаційних сигналів[2].

На відміну від праці [1] уведено нове визначення коефіцієнта придушення завад.

Розрахункові співвідношення

Для вибору N елементів АР можна скористатися відомим твердженням, що адаптивна система з такими решітками дозволяє потенційно придушити $N-1$ завад [1]. Звідси випливає перше співвідношення:

$$N = N_p + 1,$$

де N_p – кількість постачальників перешкод.

Обґрунтуємо твердження, що показник придушення завад збільшується зі збільшенням кількості елементів АР.

Уведемо визначення показника придушення завад у вигляді [2]:

$$Q = 20 \lg |G(\theta_p, \varepsilon_p)| - 20 \lg |G(\theta_c, \varepsilon_c)|, \quad (1)$$

$$G(\theta, \varepsilon) = \sum_{n=0}^{N_x-1} \sum_{m=0}^{N_y-1} \sum_{k=0}^{N_z-1} \omega_{n,m,k} \cdot \exp \psi_{n,m,k};$$

$$\psi_{n,m,k} = j \frac{2\pi}{\lambda} (n \cdot dx \cdot \sin \theta \cdot \cos \varepsilon + m \cdot dy \cdot \sin \theta \cdot \sin \varepsilon + k \cdot dz \cdot \cos \theta)$$

де θ, ε – азимут і кут місця напрямку надходження; λ – довжина хвилі сигналу, що приймається;

$\omega_{n,m,k}$ – вагові коефіцієнти адаптації;

dx, dy, dz – відстані між елементами вздовж осей;

N_x, N_y, N_z – кількості елементів по осях просторової АР;

$\theta_p, \varepsilon_p, \theta_c, \varepsilon_c$ – азимуту та кути місця випромінювання завади і сигналу відповідно.

При цьому передбачається, що початок координат збігається з однією із вершин решітки.

Припустимо, що випромінювачі АР ідентичні та ізотропні. Амплітудний розподіл електромагнітного поля по апертурі рівномірний.

За цих умов функцію діаграми спрямованості АР можна записати у вигляді [3]:

$$G(\theta, \varepsilon) = G_x(\alpha) \cdot G_y(\beta) \cdot G_z(\varepsilon);$$

$$G_x(\alpha) = \sum_{n=0}^{N_x-1} \omega_n \cdot \exp(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot dx \cdot \cos \alpha);$$

$$G_y(\beta) = \sum_{m=0}^{N_y-1} \omega_m \cdot \exp(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot m \cdot dy \cdot \cos \beta);$$

$$G_z(\varepsilon) = \sum_{k=0}^{N_z-1} \omega_k \cdot \exp(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot k \cdot dz \cdot \cos \varepsilon);$$

$$\cos \beta = \sin \varepsilon \cdot \cos \theta;$$

$$\cos \beta = \sin \varepsilon \cdot \sin \theta.$$

Розглянемо адаптивну систему з лінійною АР. Якщо кути надходження сигналів і завад відомі, то вагові коефіцієнти адаптації обчислюємо згідно з виразом [2]:

$$W = \Phi^{-1} \cdot B, \quad (2)$$

де W – вектор вагових коефіцієнтів;

Φ – матриця амплітудно-фазових розподілів (АФР) сигналів і завад по елементах АР;

B – вектор коефіцієнтів, що дорівнюють нулю в рядках АФР завад і одиниці в рядках АФР сигналів системи рівнянь (2).

За точного обчислення компонент вектора W згідно з рівнянням (2) та без впливу дестабілізуювальних факторів з урахуванням нормування значення діаграми спрямованості в напрямі приймання сигналу та завади відповідно дорівнюють:

– у разі приймання сигналу

$$G_x(\alpha_c) = N_x;$$

– у разі приймання завади

$$G_x(\alpha_p) = 0.$$

Це впливає з того, що вагові коефіцієнти розраховано таким чином, щоб сигнали склалися когерентно, а зважені відліки завади взаємно компенсувались.

Отже, зі збільшенням кількості елементів решітки в γ раз приріст показника придушення завад становитиме:

$$\Delta Q = 20 \lg \gamma. \quad (3)$$

Якщо АР багатовимірна з

$$N_x = N_y = N_z,$$

$$dx = dy = dz$$

і рівними γ , одержимо вираз

$$\Delta Q = N_R \cdot 20 \lg \gamma, \quad (4)$$

де N_R – розмірність решітки.

Для підвищення точності обчислення компонент вектора W відповідно до виразу (2), потрібна мінімізація помилок вимірювання кутів надходження завади. Напрямки надходження сигналів визначаються в навігаційних приймачах з досить високою точністю.

Відомий вираз для середньоквадратичної помилки визначення пеленга [4]:

$$\delta\theta = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\theta_0}{q}, \quad (5)$$

де θ_0 – ширина парціальної пелюстки діаграми спрямованості АР на рівні 0,5;

q – відношення сигнал/шум на вході вимірника.

Як показано в праці [5]:

$$\theta_0 = 50,8 \frac{\lambda}{A_{\text{еф}}}, \quad (6)$$

де $A_{\text{еф}}$ – ефективна поверхня антени.

Ефективну поверхню визначають за кількістю елементів N і кроком d еквідистантної АР. У разі фіксованого d вона пропорційна $N-1$ для лінійної і $(N-1)^2$ для плоскої АР.

Отже, зі збільшенням N підвищується точність вимірювання пеленга і відповідно ефективність придушення завади.

Збільшення $A_{\text{еф}}$ за рахунок кроку d має обмеження, яке визначаємо за виразом [5]:

$$\frac{d}{\lambda} \langle (1 + \sin \alpha_0)^{-1} \rangle,$$

де α_0 – кут відхилення променя від нормалі до розгортки АР.

Ефективна поверхня АР визначає потужність завади, що приймається, і таким чином позначається на точності вимірювання пеленга за рахунок зміни q .

Як бачимо зі співвідношень (3)–(6), конфігурація і параметри АР істотно впливають на ефективність адаптивної системи.

Для перевірки одержаних залежностей було виконано математичне моделювання.

Результати моделювання

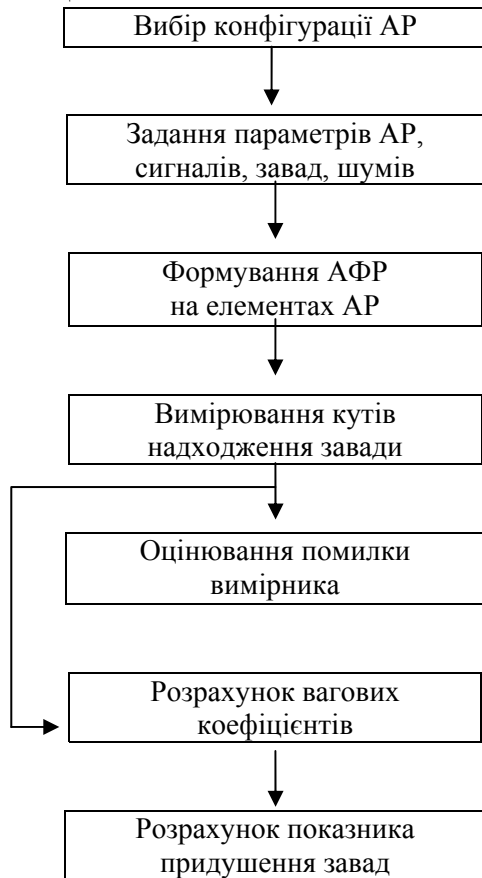
Для дослідження впливу параметрів АР на ефективність адаптивної системи розроблено комплекс моделей [6], що виконує зокрема й операції згідно з блок-схемою (див. рисунок).

Шум формується як незалежні відліки нормального процесу з нульовим математичним сподіванням і заданим середньоквадратичним відхиленням.

Вимірник кута надходження завад синтезований за критерієм максимуму функції правдоподібності [3]. Вагові коефіцієнти і показник придушення завад розраховували згідно з виразами (2) та (1) відповідно.

Оскільки немає проблем з визначенням напрямів надходження супутникових сигналів, відповідні кути в моделі вводили як відомі.

Через наявність шумів визначали середні вихідні характеристики з усередненням за 10^4 реалізаціями.



Модель підвищення ефективності адаптивної системи

Експеримент 1. Досліджуємо залежність показника придушення завади Q від кількості елементів N в адаптивній системі з лінійною АР, що орієнтована в площині надходження фронту хвилі. Кут місця надходження завади припускаємо рівним $\varepsilon_p = 60^\circ$, а кути надходження сигналів відповідно:

- якщо $N = 2$, то $\varepsilon_c = 20^\circ$;
- якщо $N = 4$, то $\varepsilon_c = [-20^\circ, 0^\circ, 20^\circ]$;
- якщо $N = 8$, то $\varepsilon_c = [-40^\circ, -30^\circ, -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ]$;

з відліком від перпендикуляра до розгортки АР. За результатами моделювання

- $Q = -186$ дБ, якщо $N = 2$;
- $Q = -192$ дБ, якщо $N = 4$;
- $Q = -198$ дБ, якщо $N = 8$.

© Е.О. Ковалевський, 2007

Приріст показника придушення

$$\Delta Q = 20 \lg 2 = 6$$

точно відповідає формулі (3) при $N_p = 1$.

Середні результати моделювання моделей систем з лінійною АР ($N_x = N_y = 2$) і просторовою ($N_x = N_y = N_z = 2$) АР наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження моделей системи

Тип АР	N_p	Q , дБ
Лінійна	1	-61,6
Плоска	2	-121,96
Просторова	3	-187,1

Дані табл. 1 також відповідають формулі (3). Відмінність в абсолютних значеннях показника Q для систем з лінійними АР пояснюється різними відношеннями завада/шум.

Отримані результати показують, що поліпшення показника придушення завади можна досягти як збільшенням кількості елементів лінійної АР, так і зміною розмірності АР. Підтверджене аналітичне співвідношення (3) дозволяє у процесі проектування системи визначати конфігурацію та потрібну кількість елементів АР для одержання показника придушення завади, обумовленого в технічному завданні.

Експеримент 2. Досліджуємо залежність показника придушення завади від значення величини завада/шум.

Для систем з $N_p = 1, 2, 3$, якщо $N = 2$, $d = 0,5\lambda$, змінюємо відношення завада/шум q і фіксуємо Q (табл. 2).

Таблиця 2

Результати зміни відношення завада/шум

q , дБ	Q , дБ		
	$N_p = 1$	$N_p = 2$	$N_p = 3$
20	-14,3	-33,8	-65
40	-34,7	-72,6	-123,3
60	-54	-111	-187,6

Із даних табл. 2 випливає, що показник придушення завади збільшується зі зростанням відношення завада/шум відповідно до залежності:

$$\Delta Q = N_p \cdot \Delta q,$$

де Δq – зміна q , дБ.

Отже, підвищення інтенсивності завади за рахунок збільшення ефективності поверхні АР поліпшує показник придушення завади.

Експеримент 3. Досліджуємо вплив помилок вимірювання кута надходження завади на показник Q .

До точного значення кута додаємо випадкову помилку, розподілену за нормальним законом з параметрами $[0, \delta_\theta]$.

Задаємо значення δ_θ , обчислюємо вагові коефіцієнти і показник Q з усередненням за 10^4 реалізаціями. Експеримент проводимо для систем з АР при $N_p = 1, 2, 3$ (табл. 3).

Таблиця 3

Результати експерименту для систем з АР

δ_θ , град	Q , дБ		
	$N_p = 3$	$N_p = 2$	$N_p = 1$
0	-509	-336	-170
10^{-2}	-331	-194	-97
10^{-1}	-262	-173	-94
0,5	-212	-132	-76
1	-168	-94	-55

Залежність $Q = f(\delta_\theta)$ за даними табл. 3 для $N_p = 3$ з великим ступенем наближення апроксимується в діапазоні зміни δ_θ у межах $[0-0,5]$ виразом

$$Q = a_0 + a_1\delta_\theta + a_2\delta_\theta^2 + a_3\delta_\theta^3,$$

де $a_0 = -500$;

$a_1 = 1,894 \cdot 10^4$;

$a_2 = -1,976 \cdot 10^5$;

$a_3 = 3,278 \cdot 10^5$.

Як бачимо, залежність $Q = f(\delta_\theta)$ має яскраво виражений нелінійний характер з тенденцією зменшення крутизни, якщо $\delta_\theta > 0,5$.

Результати математичного моделювання підтвердили наведені аналітичні співвідношення щодо залежності ефективності придушення завад від побудови АР.

Висновки

Упровадження супутникової радіонавігації припускає розроблення адаптивних систем для підвищення завадостійкості апаратури. Багатоканальна АР є важливим елементом адаптивної системи. Виконаний аналіз і математичне моделювання показали істотну залежність ефективності адаптивних систем від конфігурації і параметрів АР. Збільшення елементів АР поліпшує показник придушення завад як за рахунок кількості сигналів, що когерентно підсумовуються, так і завдяки збільшенню ефективної площини антени. У разі обмеження останньої для підвищення ефективності придушення завади можна застосувати просторову решітку.

Одержані аналітичні співвідношення дозволяють розрахувати потрібну кількість елементів АР під час проектування адаптивної системи.

Література

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – 3-е изд. /под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова, – М.: «Радиотехника», 2005. – 688 с.
2. Ковалевский Э. А. Адаптивная антенно-приемная система средств спутниковой аэронавигации // Материали 5-ї МНТК «Авіа-2003». Т. 2. Аерокосмічні системи моніторингу та керування. – К.: НАУ, 2003. – С. 21.14 – 21.17.
3. Кюн Р. Микроволновые антенны / пер. с нем. / под ред. М.П. Долуханова. – Ленинград, Судостроение, 1967. – 517 с.
4. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. – М.: Сов. родина, 1948. – 278 с.
5. Гостюхин В. Л., Гринева К. И., Трусов В. Н. Вопросы проектирования активных ФАР с использованием ЭВМ. – М.: Радиосвязь, 1983. – 248 с.
6. Дослідження проблеми і розробка методів підвищення завадостійкості супутникових систем навігації; Звіт з НДР. НДР0207U04016. Наук. керівник В. Конін, відп. викон. Е. Ковалевський. – К.: НАУ, 2006. – 182 с.

Стаття надійшла до редакції 24.09.07.