

DOI: 10.18372/2310-5461.46.14816

УДК 621.395.721.5 (045)

**О. Г. Плющ**, канд. техн. наук, доц.  
Державний університет телекомунікацій  
orcid.org/0000-0001-5310-0660  
e-mail: opliusch@yahoo.com;

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСАТОРА БОКОВИХ ПЕЛЮСТОК АНТЕНИ

### Вступ

Адаптивні антенні решітки (ААР) широко використовуються в радіолокації та телекомунікаційних мережах. Вони дозволяють вирішувати таке широке коло проблем як підвищення завадозахищеності, збільшення пропускної здатності та поліпшення якості передачі інформації. Звичайна ААР складається з певної кількості однакових антен з малим коефіцієнтом підсилення. Одним з окремих випадків ААР є компенсатор бокових пелюсток антени (КБПА) основного каналу. Така ААР складається з основної антени та антени допоміжних каналів. Основна антена має велике підсилення, в той час як антени допоміжних каналів повинні перекривати рівні бокових пелюсток основної антени. Адаптивні властивості КБПА значним чином визначаються особливостями кореляційної матриці антени допоміжних каналів. Дослідження перехідних характеристик такої системи та винайдення шляхів їх поліпшення є важливою проблемою, що потребує додаткових досліджень.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Адаптивні антенні решітки потенційно можуть значно підвищити показники роботи пристроїв у різних галузях техніки. Саме тому питання покращення характеристик ААР широко висвітлюються в науково-технічній літературі [1; 4; 5]. У праці [2] в подробицях розкрито концепцію та принципи застосування КБПА і висунуто вимоги до його елементів. Але, на жаль, автори праці [2] окремо наголошують, що поведінка ААР при зміні завадової ситуації знаходиться поза фокусом цього джерела.

У праці [3; 4] окреслюється застосування градієнтного алгоритму найскорішого спуску і підкреслюється роль власних чисел кореляційної матриці допоміжних каналів у визначенні динамічних характеристик КБПА. В той же час, у цих працях не досліджено окремо вплив вироджених та не вироджених власних чисел і відповідно не досліджено фактори, що можуть призводити до значного затягування перехідних процесів.

У працях [6; 7] представлено декілька нових алгоритмів налаштування, але не приділено достатньої уваги вивченню перехідних процесів шляхом комп'ютерного моделювання.

### Постановка завдання

Одним з алгоритмів адаптації КБПА є градієнтний алгоритм найскорішого спуску. Характеристики КБПА в процесі налаштування визначаються рознесенням власних чисел кореляційної матриці сигналів антен допоміжних каналів. Водночас не існує певного визначення які власні числа і яким чином впливають на характеристики КБПА при налаштуванні. Додатково, недостатньо опрацьовані питання поведінки градієнтного алгоритму у випадку різкої зміни завадової ситуації. Це може статися у випадку вимикання одного з джерел завади або при додаванні ще одного джерела. У праці зроблена спроба вирішити ці нагальні питання.

*Метою роботи* є дослідження того, як себе поводить КБПА при зміні завадової ситуації і як різні власні числа та відповідні власні вектори кореляційної матриці сигналів допоміжної антени впливають на динамічні характеристики цих ААР.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові завдання:

- аналіз впливу різних власних чисел та власних векторів кореляційної матриці сигналів допоміжної антени КБПА на його адаптаційні характеристики;
- розробка імітаційної комп'ютерної моделі КБПА та дослідження з її допомогою параметрів налаштування;
- розробка пропозицій щодо покращення перехідних характеристик КБПА при зміні завадової ситуації.

### Виклад основного матеріалу

#### Базова конструкція КБПА

Функціональна схема типового КБПА наведена на рис. 1 [2]. Вона включає антену основного каналу, яка позначена як  $D$  та має високе підсилення та  $N$  антен допоміжних каналів, що позначені літерою  $C$ .

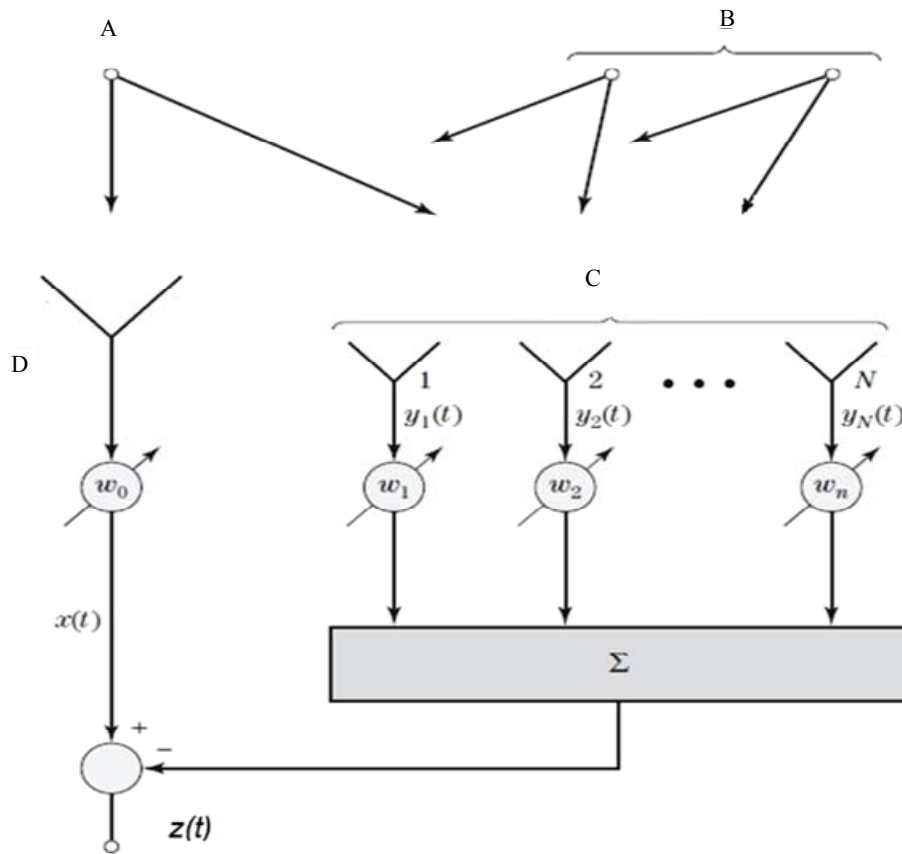


Рис. 1. Функціональна схема типового КБПА

Корисний сигнал та завадові сигнали відповідно промарковані як А та В. При конструюванні КБПА припускається, що рівень корисного сигналу в допоміжних антенах дуже малий и не приймається в розрахунок.

Підсилення допоміжних антен вибирається таким чином, щоб воно дорівнювалося підсиленню бокових пелюсток антени основного каналу.

Правильно розроблена антена допоміжних каналів формує на своєму виході копії завадових сигналів що існують у бокових пелюстках антени основного каналу.

Завадові сигнали в основній пелюстці антени основного каналу не можуть бути компенсовані, водночас як копії завадових сигналів в допоміжних каналах забезпечують когерентну компенсацію тих завадових сигналів, що падають на бокові пелюстки антени основного каналу

Скалярному значенню ваги  $w_0$  на рис. 1 може бути надане любе зручне ненульове значення. Ваги  $w_1, \dots, w_n$  налаштовуються відповідно з вибраним алгоритмом адаптації.

Якщо  $w_0$  встановлено 1, вихідний сигнал КБПА може бути записаний так [2]:

$$z(t) = x(t) - \mathbf{w}^T \mathbf{y}(t), \quad (1)$$

де  $\mathbf{w}^T$  — ваговий вектор допоміжних каналів;  $\mathbf{y}(t)$  — вектор сигналів у допоміжних каналах;  $x(t)$  — сигнал на виході основного каналу.

Вихідна потужність КБПА в сталому режимі визначається рівнянням:

$$P_{\text{Out}} = E \{ z^2(t) \} = P_0 - 2\mathbf{w}^T \mathbf{r}_{yx} + \mathbf{w}^T \mathbf{R}_{yy} \mathbf{w}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{R}_{yy}$  — кореляційна матриця сигналів допоміжних каналів;  $\mathbf{r}_{yx}$  — вектор кореляції сигналу основного каналу та сигналів допоміжних каналів;  $P_0$  — потужність сигналу в основному каналі;  $E$  — математичне усереднення.

Квадратична функція (2) від  $w$  являє собою робочу поверхню і її екстремум є мінімумом, що визначається рівнянням Винера–Хопфа для оптимального вагового вектору:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_{yy}^{-1} \mathbf{r}_{yx}. \quad (3)$$

Для досягнення оптимального рішення (3), градієнтний алгоритм найшвидшого спуску передбачає наступну формулу для налаштування вагового вектору для комплексних значень [2]:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\Delta_s z(k) \mathbf{y}^*(k), \quad (4)$$

де  $\mathbf{w}(k+1)$  є нове значення вагового вектору в момент часу  $kT$ ;  $\mathbf{w}(k)$  є значення вагового вектору в момент часу  $kT$ ;  $\Delta_s$  є константа що

визначає крок налаштування; \* — позначає комплексне спряження.

*Комп'ютерне моделювання КБПА в стаціонарному режимі*

Імітаційне комп'ютерне моделювання для КБПА на рис. 1 було проведено для лінійної вузько-смугової антенної решітки з наступними параметрами: кількість елементів в антені допоміжних каналів — 4, відстань між елементами — півтривалості хвилі, антена основного каналу побудована у вигляді 5-елементної решітки з тим самим між-елементним інтервалом — півтривалості хвилі.

Відносна потужність внутрішнього шуму кожної антени вибрана одиниця. Три джерела завадових сигналів мають кути падіння відповідно  $-60,0$ ,  $-30,0$  та  $15,0$  градусів, з

відповідними рівнями потужності 100, 200 та 150 відносних одиниць. Для завадового середовища окресленого вище, з урахуванням виразу (3), рис. 2 демонструє діаграму направленості антени основного каналу (А), діаграму антени допоміжних каналів (В) та результуючу адаптовану діаграму (С), яка по суті є різницею між першою та другою. Додатково, рис. 2 показує кути приходу завадових сигналів 1 та нулі, що формуються в результуючій діаграмі 2.

D позначає по горизонтальній вісі кут падіння сигналу відносно нормалі в радіанах, в той час як E по вертикальній вісі позначає рівень діаграми в разях.

Загалом, рис. 2 ілюструє потенційно досягну результуючу адаптовану діаграму направленості по завершенню адаптаційного процесу.

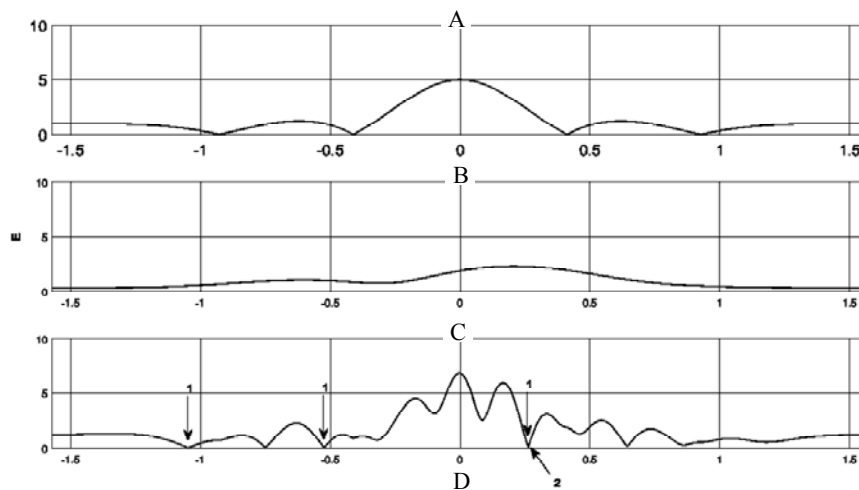


Рис. 2. Отримання результуючої адаптованої діаграми

Перед тим як перейти до дослідження перехідних характеристик, необхідно приділити увагу властивостям кореляційної матриці  $R_{yy}$  з виразів (2) та (3).

Для завадової ситуації окресленої вище, ця матриця має такі власні числа: 1.0, 250.4, 609.3, 943.3, що показує на присутність трьох не вироджених чисел та одного виродженого. Дуже важливим для перехідних характеристик є встановлення положення оптимального вектору (3) відносно власних векторів, що відповідають цим власним числам.

Для цього потрібно обрахувати квадрати косинусів між оптимальним ваговим вектором (3) та усіма власними векторами, використовуючи відомі формули для комплексних векторів [2]. Для ситуації що розглядається, ці значення дорівнюють 0.0, 0.3649, 0.3059 та 0.3292.

Аналіз цих чисел ясно показує на те, що оптимальний ваговий вектор (3) має такі властивості:

1. Оптимальний ваговий вектор є ортогональний до того власного вектору, що відповідає виродженому власному числу;

2. Оптимальний ваговий вектор не є ортогональний до власних векторів, що відповідають не виродженим власним числам;

3. Оптимальний ваговий вектор повністю належить підпростору, що створений тими власними векторами, які відповідають не виродженим власним числам тому, що сума квадратів косинусів дорівнює одиниці ( $0.3649 + 0.3059 + 0.3292 = 1$ );

4. Найбільш важливим є те, що якщо початкове значення вагового вектору дорівнює нулю, тоді це означає, що вироджені власні числа не впливають на перехідні характеристики

і під час адаптації ваговий вектор ніколи не попадає в той підпростір, що вони визначають.

Автори протестували КБПА в різних заводових ситуаціях і вище наведена умова виконувалася. Що потрібно дослідити, тим не менш, це те що буде, якщо з будь якої причини траєкторія адаптації згідно з виразом (4) опиниться у підпросторі, що відповідає виродженому власному числу.

*Перехідні характеристики зі штучно зміненою траєкторією адаптації вагового вектору*

Для вивчення того, як себе поводить КБПА коли траєкторія налаштування заходить у підпростір що відповідає виродженому власному числу, початкове значення вагового вектору в виразі (4) було навмисно пересунуто у напрямку цього власного вектору зі скалярними коефіцієнтами 1, 2 та 3. Звичайно, для порівняння необхідно також оцінити перехідні характеристики для заводової ситуації наведеної вище з початковим ваговим вектором що дорівнює нулю.

Комп'ютерне імітаційне модулювання базується на розрахунку коефіцієнту придушення завади на виході КБПА. Внутрішні шуми каналів та заводові сигнали були представлені комплексними відліками з нормальним розподіленням вірогідності. Потенціальне значення коефіцієнту придушення завади, для ситуації що розглядається, становить 25,7 дБ.

Рис. 3 ілюструє залежність коефіцієнту придушення завади (С) на виході антени основного каналу (А) від кількості ітерацій (В) при нульовому початковому ваговому векторі в допоміжних каналах.

Рис. 4 показує ту саму залежність тільки в ситуації, коли початковий ваговий вектор є зсунутий в напрямку власного вектору, що відповідає виродженому власному числу з коефіцієнтом 1. Рис. 5, 6 відрізняються від рис. 4 тим, що в них ваговий вектор зсунутий в напрямку власного вектору, що відповідає виродженому власному числу, з коефіцієнтами відповідно 2 та 3.

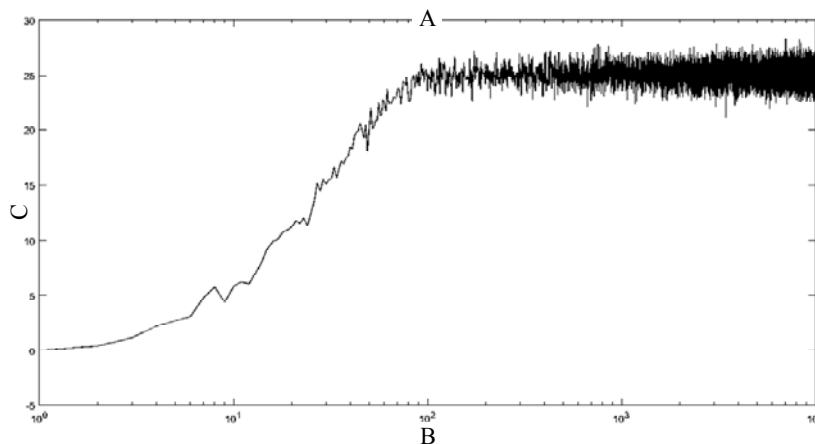


Рис. 3. Залежність коефіцієнта придушення завади (С) на виході основного каналу від кількості ітерацій (В) і нульовому початковому ваговому векторі

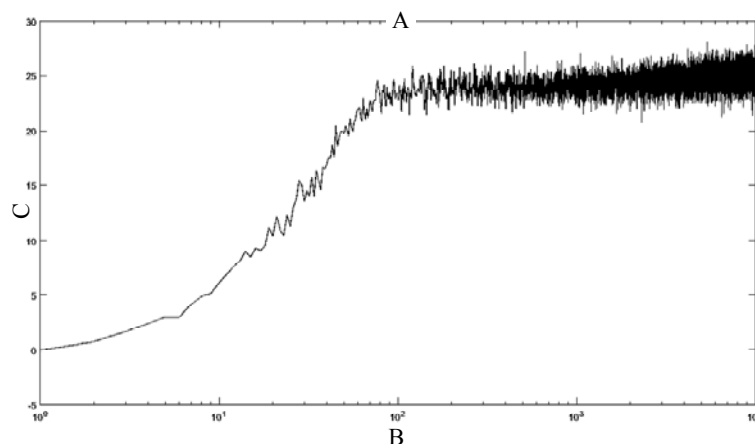


Рис. 4. Залежність коефіцієнта придушення завади на виході основного каналу (С) від кількості ітерацій (В) і початковому ваговому векторі у вигляді власного вектору, що відповідає виродженому власному числу взятому з коефіцієнтом 1

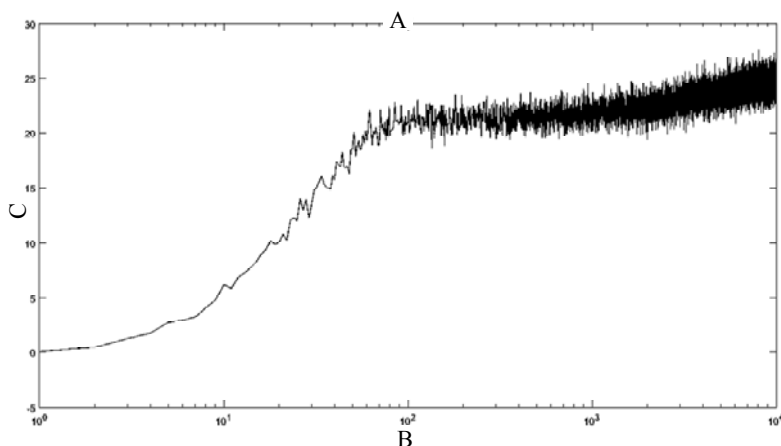


Рис. 5. Залежність коефіцієнта придушення завади (С) на виході основного каналу від кількості ітерацій (В) і початковому ваговому векторі у вигляді власного вектору, що відповідає виродженому власному числу взятому з коефіцієнтом 2

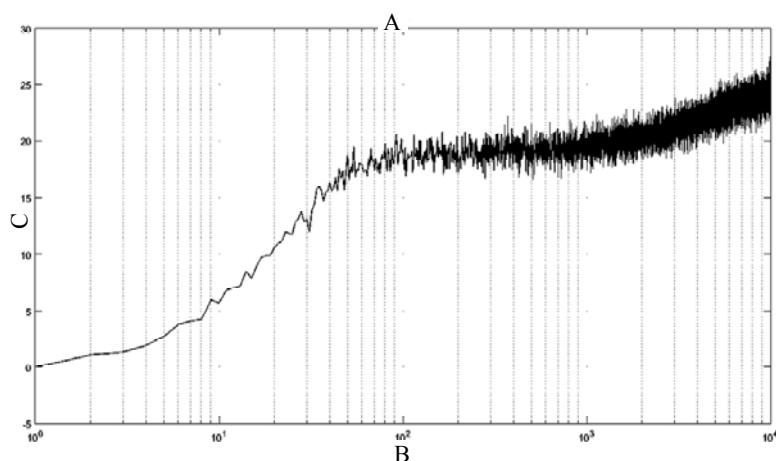


Рис. 6. Залежність коефіцієнта придушення завади (С) на виході основного каналу від кількості ітерацій (В) і початковому ваговому векторі у вигляді власного вектору, що відповідає виродженому власному числу взятому з коефіцієнтом 3

*Перехідні характеристики у випадку з природно виникаючими змінами траєкторії адаптації вагового вектору*

Залежності представлені на рис. 3, 4, 5 та на рис. 6 ясно показують на те, що якщо траєкторія вагового вектору в адаптаційному періоді переміщується у напрямку того власного вектору, що відповідає виродженому власному числу, перехідні характеристики алгоритму значно погіршуються.

Цей феномен пояснюється тим фактом, що крутизна спуску вздовж цього власного вектору визначається виродженим власним числом.

Це вироджене власне число дорівнює потужності внутрішнього шуму, і тому крутизна дуже мала.

Ситуація окреслена вище показує на можливі проблеми з налаштуванням КБПА, але вона була створена штучно.

Необхідно перевірити чи не можуть такі ситуації виникати природно при зміні в заводовому середовищі.

Практичний інтерес викликає встановлення того факту, чи може траєкторія вагового вектору потрапити в підпростір, що формується власним вектором, який відповідає виродженому власному значенню, природним шляхом.

Для дослідження цієї ідеї, припустимо, що третій заводовий сигнал раптово зник. Це буде означати, що заводове середовище тепер створюється тільки двома сигналами: з кутами надходження  $-60.0$ ,  $-30.0$  та відносними потужностями 100 та 200 одиниць. У цьому випадку, початкове значення вагового вектору в новій ситуації дорівнює ваговому вектору з попередньої ситуації. Комп'ютерне моделювання для цього випадку наведено на рис. 7, де А, В та С позначають те, що і вище.

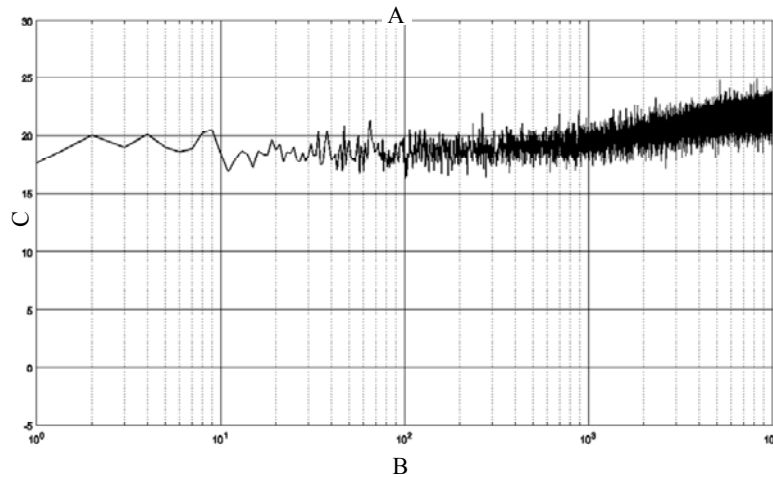


Рис. 7. Залежність коефіцієнта придушення завади (С) на виході основного каналу від кількості ітерацій (В) для початкового вагового вектору, що дорівнює оптимальному ваговому вектору з попередньої завадової ситуації

Для цієї ситуації, власні числа складають 1.0, 1.0, 322.4 та 879.6, в той час як квадрати косинусів між початковим ваговим вектором та власними векторами, що відповідають виродженим власним числам, дорівнюють 0.2037 та 0.6320. Це означає, що в цій новій ситуації, траєкторія налаштування проходить через підпростір з низькою крутизною спуску і існують втрати в коефіцієнті придушення до 5 dB на великій ділянці траєкторії. Слід зауважити, що потенційно досягне значення коефіцієнта придушення становить 22.5 dB.

Якщо в другій завадовій ситуації початкове значення вагового вектору встановлено нулю, процес адаптації буде проходити як показано на рис. 8.

Хоча обнуління початкового вагового вектору зменшує коефіцієнт придушення порівняно з не виконанням цієї операції на початку налаштування (до 30 ітерацій), алгоритм з обнулінням початкового вагового вектору швидко налаштовується і забезпечує вигравш до 4–5 dB порівняно з відсутністю обнуління.

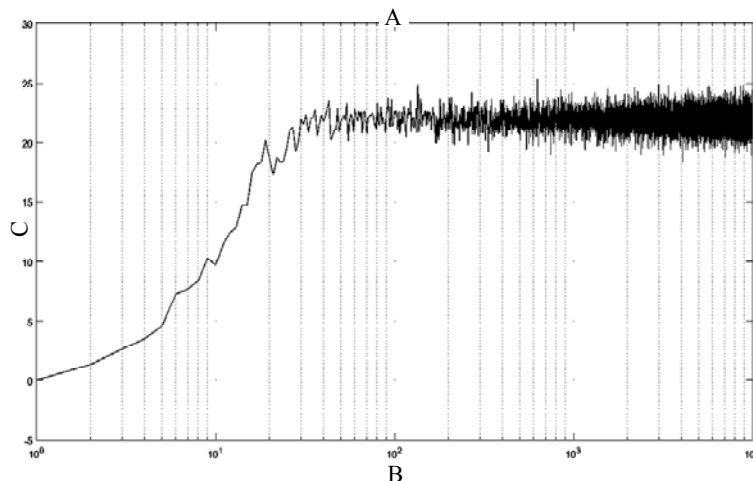


Рис. 8. Залежність коефіцієнта придушення завади (С) на виході основного каналу від кількості ітерацій (В) для другої завадової ситуації у випадку коли початковий ваговий вектор дорівнює нулю

### Висновки

Власні вектори кореляційної матриці допоміжних каналів КБПА створюють два підпростори з різним впливом на перехідні характеристики. Якщо початковий ваговий вектор дорівнює нулю, траєкторія процесу

адаптації завжди знаходиться в підпросторі тих власних векторів, що відповідають не виродженим власним числам і перехідні характеристики добрі.

Якщо початкове значення вагового вектору не є нульовим, траєкторія налаштування може про-

ходити через той підпростір, що відповідає виродженим власним числам, що може значно затягувати процес налаштування. Пропонується превентивно встановлювати значення початкового вагового вектора нулю тоді, коли відбуваються різкі зміни заводової ситуації. Цей захід може значно покращити характеристики тих КБПА, що використовуються як в радіолокаціях так і телекомунікаційних системах.

#### Подальші дослідження

В подальшому, доцільно зосередити увагу на дослідженні впливу підпросторів, що утворюються власними векторами, на перехідні характеристики традиційних ААР, в яких всі елементи антени є еквівалентними.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гепко И. А., Олейник В. Ф., Чайка Ю. Д., Бондаренко А. В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. Киев. 2009. 672 с.

2. Robert A. Monzingo, Randy L. Haupt, Thomas W. Miller. Introduction to adaptive arrays, 2nd ed. New York. 2011. 553 p.

3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Под ред. Ширмана Я. Д. Москва. 2007. 512 с.

4. John Volakis, Antenna Engineering Handbook. 5th ed. New York. 2018. 1755 p.

5. Robert J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook. 3rd ed. Boston. 2018. 506 p.

6. Григорьев В. А., Щесняк С. С., Гулюшин В.Л., Распаев Ю. А., Лагутенко О. И., Щесняк А. С. Адаптивные антенные решетки: учеб. пособие в 2-х частях. Часть 1. СПб. 2016. 179 с.

7. Pliushch O. G., "Gradient Signal Processing Algorithm for Adaptive Antenna Arrays Obviating Reference Signal Presence," presented at the IEEE International Scientific-Practical Conference PIC S&T, Kyiv, Ukraine, October 8–11, 2019, Paper 190.

Плющ О. Г.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСАТОРА БОКОВИХ ПЕЛЮСТОК АНТЕНИ

*В статті досліджено перехідні характеристики компенсатора бокових пелюсток антени. З аналізу літературних джерел встановлено, що недостатньо приділено уваги вивченню впливу різних власних чисел та відповідних власних векторів кореляційної матриці сигналів каналів допоміжної антени на процеси адаптації. Додатково встановлено, що не в повній мірі висвітлені питання адаптації при різкій зміні заводової ситуації. Виходячи з цього, проведено аналіз як впливу власних векторів кореляційної матриці, що відповідають не виродженим власним числам так і тих, що відповідають виродженим власним числам. Встановлено, що при нульовому значенні початкового вектору вагових коефіцієнтів траєкторія вагового вектору завжди знаходиться у підпросторі, що утворюється власними векторами що відповідають не виродженим власним числам і при цьому забезпечуються добрі характеристики перехідного процесу. Для дослідження процесів проведено імітаційне комп'ютерне моделювання. З його допомогою показано, що якщо початковий ваговий вектор штучно змістити у підпростір, що утворюється власними векторами що відповідають виродженим власним числам, перехідні характеристики значно погіршуються. Показано, що ситуації коли початковий ваговий вектор опиняється в підпросторі, що утворюється власними векторами що відповідають виродженим власним числам, може утворюватися природнім шляхом. Наприклад, це може трапитися коли після закінчення перехідного процесу одне з заводових джерел вимикається. Досліджена одна з таких ситуацій і показано, що адаптаційні процеси можуть сильно загальмовуватися. Для вирішення проблеми запропоновано проводити примусове обнуління вагового вектору. Комп'ютерне моделювання підтвердило, що виграш від такого підходу може складати до 4–5 Дб. Запропоновано використовувати процедуру примусового обнуління вагового вектору при різкій зміні заводової ситуації для покращення перехідних характеристик в компенсаторах бокових пелюсток антени, що використовуються у радіолокації та телекомунікаційних мережах.*

**Ключові слова:** компенсатор бокових пелюсток; адаптивна антена решітка; градієнтний алгоритм; комп'ютерне моделювання; телекомунікаційні мережі.

Pliushch O.G.

#### PERFORMANCE STUDY OF ANTENNA SIDELobe CANCELER

*In this paper transient performance of antenna sidelobe canceler is studied. As literature analysis indicates, it is not paid enough attention to research into the influence of different eigenvalues and corresponding eigenvectors of auxiliary antenna channels correlation matrix on the adaptation process. Additionally, the problems linked to the adaptation in abruptly changing interference situations are not fully explored. Hence, the impact of the correlation matrix eigenvectors corresponding to both distinct eigenvalues and singular eigenvalues is analyzed. It is established that if the initial value of the weight vector equals zero, weight vector trajectory always belongs to the subspace created by the eigenvectors corresponding to distinct eigenvalues and, in this case, good transient performance is secured. Computer simulation is carried out to study the processes. It helped to show that if the initial weight vector is shifted artificially into the subspace created by the eigenvectors corresponding to the singular eigenvalues, transient performance greatly degrades. It is shown that the situation when initial weight vector finds itself in the subspace*

created by the eigenvectors corresponding to the singular eigenvalues can occur naturally. For example, it can take place when, after the termination of the transient process, one of the interfering signals gets switched off. One of such situations is studied and it shows that adaptation process can greatly decelerate. To resolve the problem, it is proposed to obligatory set to zero the weight vector value. Computer simulation has shown that the gain from this approach can reach up to 4-5 dB. It is proposed to use obligatory setting to zero procedure in abrupt changes of the interference environment to improve transient performance in antenna sidelobe cancelers that are used in radiolocation and telecommunication networks.

**Keywords:** sidelobe canceler; adaptive antenna array; gradient algorithm; computer simulation; telecommunication networks.

**Плющ А. Г.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЕНСАТОРА БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ АНТЕННЫ**

*В статье исследованы переходные характеристики компенсатора боковых лепестков антенны. Из анализа литературных источников установлено, что недостаточно уделяется внимания изучению влияния разных собственных чисел и соответствующих собственных векторов корреляционной матрицы сигналов каналов вспомогательной антенны на процессы адаптации. Дополнительно найдено, что не в полной мере освещены вопросы адаптации при резкой смене помеховой ситуации. Исходя из этого, проведен анализ влияния как собственных векторов корреляционной матрицы, что соответствуют не вырожденным собственным числам так и тех, которые соответствуют вырожденным собственным числам. Установлено, что при нулевом значении начального вектора весовых коэффициентов траектория весового вектора всегда находится в подпространстве, которое создается собственными векторами, что соответствуют не вырожденным собственным числам и при этом обеспечиваются хорошие характеристики переходного процесса. Для исследования процессов проведено имитационное компьютерное моделирование. С его помощью показано, что, если начальный весовой вектор искусственно сместить в подпространство, которое создается собственными векторами, что соответствуют вырожденным собственным числам, переходные характеристики существенно ухудшаются. Показано, что ситуации, когда начальный весовой вектор оказывается в подпространстве, которое создается собственными векторами, что соответствуют вырожденным собственным числам, может создаваться естественным образом. Например, это может произойти, когда после окончания переходного процесса один из помеховых источников выключается. Исследована одна из таких ситуаций и показано, что адаптационные процессы могут сильно тормозиться. Для решения проблемы предложено проводить принудительное обнуление весового вектора. Компьютерное моделирование подтвердило, что выигрыш от такого подхода может составлять до 4-5 Дб. Предложено использовать процедуру принудительного обнуления весового вектора при резкой смене помеховой ситуации для улучшения переходных характеристик в компенсаторах боковых лепестков антенны, которые используются в радиолокации и телекоммуникационных сетях.*

**Ключевые слова:** компенсатор боковых лепестков; адаптивная антенная решетка; градиентный алгоритм; компьютерное моделирование; телекоммуникационные сети.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2020 р.

Прийнято до друку 22.06.2020 р.