

УДК 621.395.721.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2020.044149

О. Г. ПЛЮЩ¹, канд. техн. наук, доцент;В. В. ВИШНІВСЬКИЙ¹, доктор техн. наук, професор;С. В. ТОЛЮПА², доктор техн. наук, професор;С. В. ПРОКОПОВ¹, канд. техн. наук, доцент;С. М. ІЩЕРЯКОВ¹, канд. техн. наук, доцент,¹ Державний університет телекомунікацій, Київ² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАЛАШТУВАННЯ АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Однією з головних характеристик роботи адаптивних антенних решіток із градієнтним алгоритмом найшвидшого спуску в телекомунікаційних мережах інформаційних систем є швидкість їх налаштування. Зазвичай оцінювання перехідних процесів виконується комп'ютерним імітаційним моделюванням. Серед головних недоліків такого підходу є значні витрати часу на створення відповідної моделі, великий обсяг обчислень, що призводить до досить тривалого часу проведення потрібних математичних операцій, та обмежені можливості щодо інтерпретації результатів моделювання. Запропоновано універсальний показник оцінювання характеристик налаштування адаптивних антенних решіток, що оптимізується за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки і який не потребує проведення затратного імітаційного моделювання перехідних процесів. Інтегральний показник набуває значення від одиниці, що відповідає найшвидшому процесу адаптації, до нуля, що унаочнює відсутність адаптації, і будується з урахуванням розподілу власних чисел кореляційної матриці решітки, квадратів напрямних косинусів оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці антенної решітки та сліду цієї кореляційної матриці. Завдяки комп'ютерному імітаційному моделюванню було встановлено, що розроблений показник дає змогу коректно спрогнозувати швидкість перехідних процесів в адаптивних антенних решітках та здійснити їх порівняльне оцінювання для різних заводських ситуацій. Додатково дані обчислень, що використовуються для отримання цього показника, дають можливість наочно пояснити характер перехідних процесів в адаптивній антенній решітці.

Ключові слова: телекомунікаційні мережі; адаптивні антенні решітки; інтегральний показник; процес адаптації; комп'ютерне моделювання; інформаційні системи.

ВСТУП

Постановка задачі. Технології МІМО (multiple input — multiple output) дістають дедалі більшого розвитку в телекомунікаційних мережах. Однією зі складових цих технологій є адаптивні антенні решітки (ААР), які дають змогу істотно покращити завадозахищеність, пропускну здатність та якість передавання інформації в мережах мобільного зв'язку. Важливою характеристикою антенної решітки є тривалість процесу її налаштування для вибраного алгоритму адаптації. Широкого поширення для налаштування ААР набули градієнтні алгоритми найшвидшого спуску. Для цих алгоритмів швидкість налаштування значною мірою залежить від характеристик кореляційної матриці решітки, а саме її власних чисел та відповідних власних векторів. На етапі розробки ААР або під час їх порівняльного аналізу для оцінювання характеристик перехідного процесу потрібно здійснювати імітаційне комп'ютерне моделювання процесу адаптації. Таке моделювання може призводити до значних витрат часу на створення відповідної моделі, при цьому випробування моделі потребує проведення великої кількості математичних операцій. Крім того, криві налаштування ААР відповідно до вибраного алгоритму мають обмежені можливості щодо інтерпретації результатів моделювання і розуміння факторів, що спричиняють загаювання перехідних процесів.

З огляду на зазначене синтез інтегрального показника для виконання порівняльного аналізу характеристик перехідних процесів в ААР, який не потребує проведення імітаційного комп'ютерного моделювання та має можливість наочно пояснювати фактори, котрі впливають на ці процеси, є важливою задачею, що є на часі та потребує свого вирішення.

Аналіз літературних джерел. ААР відіграють велику роль у задоволенні вимог, які висуваються до елементів телекомунікаційних мереж. Це спонукає до проведення інтенсивних досліджень із метою покращення показників функціонування ААР і, як результат, доробки цих досліджень, що широко висвітлюються в науково-технічній літературі [1; 4; 5]. У публікації [1] запропоновано багато технологій та методів, використовуваних у безпроводових телекомунікаційних мережах, зокрема застосування

ААР. Хоча в цій праці і наголошується, що антенні решітки мають великий потенціал для використання в безпроводових мережах, вибору певних алгоритмів налаштування, що відповідають умовам таких систем, увагу не приділено та певні рекомендації не опрацьовано. Праця [2] може вважатися фундаментальною щодо антенних решіток. Її автори системно розглядають основні різновиди ААР та їх сфери застосування, від акустичних локаторів до телекомунікаційних систем. У цій праці описано як сталий, так і перехідний режими роботи ААР. У [2] розроблено різноманітні алгоритми налаштування та наведено результати імітаційного моделювання для різних заводових ситуацій. Але, на жаль, поведінка ААР у разі різкої зміни заводової ситуації не розглядається. Крім того, автори в [2] недостатньо глибоко опрацьовали фактори, що впливають на процеси адаптації під час використання градієнтних алгоритмів найшвидшого спуску, особливо ті, що пов'язані з проєкціями оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці.

У роботах [3; 4] сформульовано застосування градієнтного алгоритму найшвидшого спуску для оптимізації роботи ААР за критерієм середньоквадратичної помилки та висвітлено вплив власних чисел кореляційної матриці на динамічні характеристики системи. Однак ці праці є більш теоретичними та не несуть у собі результатів перевірки перехідних процесів в ААР з використанням градієнтних алгоритмів налаштування методами комп'ютерного моделювання.

У [5] подано кілька нових алгоритмів налаштування і запропоновано оригінальний підхід до оцінювання працездатності ААР, але не приділено достатньої уваги пошуку інтегральних показників оцінювання збігання градієнтних алгоритмів до оптимального значення.

У джерелах [7; 8] створено оригінальний градієнтний алгоритм налаштування адаптивної антенної решітки за критерієм мінімуму дисперсії шуму та здійснено його дослідження в телекомунікаційному середовищі. Але хоча в цих джерелах проведено імітаційне комп'ютерне моделювання для різних заводових ситуацій, вивченню факторів, що впливають на характеристики перехідних процесів в ААР, увагу не приділено.

Загалом, автори сходяться в думці, що наявні літературні джерела не містять відомостей про існування інтегральних показників, які характеризують процес налаштування адаптивних антенних решіток, та навіть щодо можливих шляхів їх синтезу.

Невирішені питання. Вивчення джерел інформації дає змогу дійти висновку, що питанням пошуку та розробленню інтегрального показника оцінювання процесу налаштування в адаптивних антенних решітках із градієнтними алгоритмами найшвидшого спуску не приділяється достатньої уваги. У разі його розроблення цей інтегральний показник може значно спростити та пришвидшити процес перевірки адаптивних властивостей ААР, які можуть застосовуватися в телекомунікаційних мережах. Отже, зазначений науковий напрямок потребує уваги фахівців у цій галузі і заслуговує на подальші дослідження. Загалом, проблема пошуку нових шляхів та методів оцінювання перехідних процесів в ААР телекомунікаційних мереж інформативних систем потребує нагального вирішення.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є синтез інтегрального показника оцінювання процесів налаштування в адаптивних антенних решітках та перевірка його властивостей стосовно коректного відображення суті перехідних процесів в ААР та здійснення порівняльного аналізу адаптаційних характеристик у різних заводових ситуаціях під час використання в телекомунікаційних мережах.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові задачі:

- аналіз впливу на перехідні процеси розташування оптимального вагового вектора решітки відносно власних векторів кореляційної матриці ААР та ролі відповідних власних чисел цієї матриці;
- синтез інтегрального показника оцінювання процесів налаштування в адаптивних антенних решітках;
- проведення дослідження коректності порівняльного оцінювання перехідних процесів в ААР за допомогою розробленого інтегрального показника в різних заводових ситуаціях із використанням імітаційного комп'ютерного моделювання.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Аналіз впливу на перехідні процеси розташування оптимального вагового вектора решітки відносно власних векторів кореляційної матриці ААР

Швидкість налаштування ААР відповідно до вибраного алгоритму є одним із головних показників функціонування адаптивних антенних решіток у телекомунікаційних мережах інформаційних систем. Як правило, для телекомунікаційних мереж вибираються ААР, що оптимізуються за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки. У таких антенних решітках для налаштування необхідна наявність опорного сигналу та використовують градієнтні алгоритми найшвидшого спуску завдяки їх простоті технічної реалізації, надійності та ефективності.

Сталою думкою в джерелах інформації є те, що збігання градієнтного алгоритму адаптації до оптимального значення вагового вектора з використанням критерію мінімуму середньоквадратичної помилки значною мірою залежить від розподілення власних чисел кореляційної матриці ААР, особливо якщо серед цих чисел є істотна розбіжність за значенням. Згідно з цією теорією перехідний процес не буде закінчено, якщо не буде завершено процес збігання для найменшого власного числа кореляційної матриці. Геометрично це пояснюється тим фактом, що за наявності істотної розбіжності серед власних чисел кореляційної матриці робочі поверхні постійного рівня середньоквадратичної помилки являють собою багатовимірні еліпсоїди, що значно витягнуті у певних напрямках. Ці напрями відповідають головним осям квадратичної поверхні середньоквадратичної помилки, які, у свою чергу, збігаються з власними векторами кореляційної матриці ААР.

Недосконалість існуючого підходу до оцінювання тривалості перехідних процесів решітки через дослідження власних чисел полягає в тому, що хоча малі значення власних чисел потенційно дійсно можуть створювати проблеми із загалом часу адаптації, не всі ці потенційні труднощі втілюються на практиці.

Розглянемо ситуацію, коли початкове значення вагового вектора перед початком адаптації є нульовим. Тоді траєкторія, яку долає ваговий вектор під час налаштування від нульового значення до оптимального, не завжди проходить у підпросторах, породжених власними векторами, що відповідають малим власним числам. Інакше кажучи, не всі власні числа впливають на процес адаптації.

Щоб з'ясувати, які власні числа мають певний вплив на перехідні процеси в ААР при нульовому початковому значенні вагового вектора, потрібно знайти проєкції оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці решітки і порівняти розмір проєкції та значення відповідного власного числа.

Взаємозв'язок між значеннями власних чисел та проєкцій оптимального вагового вектора на власні вектори, що відповідають цим власним числам, для чотирьох заводових ситуацій в ААР, що складається з п'яти ненапрямлених елементів, які перебувають на віддаленні один від одного на напівтривалості хвилі, ілюструє табл. 1.

Таблиця 1

Взаємозв'язок між значеннями власних чисел та проєкцій оптимального вагового вектора на власні вектори, що відповідають цим власним числам

Номер ситуації	Кут приходу корисного сигналу та його потужність	Кут приходу заводових сигналів та його потужність	Значення власних чисел кореляційної матриці	Квадрати напрямних косинусів оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці
1	-30°; 100	-47,648°; 100 -57,296°; 150 -38,648°; 200	1,0 1,2 32,3 600,9 2119,6	0,0000 0,3984 0,5725 0,0265 0,0025
2	-15°; 100	-47,648°; 100 -57,296°; 150 -38,648°; 200	1,0 2,4 243,9 607,4 1900,4	0,0000 0,3883 0,3134 0,2978 0,0005
3	15°; 100	-47,648°; 100 -57,296°; 150 -38,648°; 200	1,0 4,0 350,8 486,1 1913,1	0,0000 0,1542 0,0141 0,8291 0,0026
4	30°; 100	-47,648°; 100 -57,296°; 150 -38,648°; 200	1,0 4,9 258,3 594,4 1896,4	0,0000 0,0003 0,4717 0,5279 0,0001

Аналіз даних, наведених у табл. 1, дає можливість дійти таких висновків:

- значення власних чисел кореляційної матриці ААР змінюються незначно. Лише в першій заводовій ситуації третє власне число істотно відрізняється від третіх власних чисел в інших ситуаціях. При цьому перше власне число для всіх ситуацій завжди дорівнює власним шумам каналів — одна умовна одиниця. З огляду на ці факти та традиційне судження про вплив власних чисел на тривалість перехідних процесів можливо припустити, що вони будуть однаковими для всіх ситуацій, але це не так;

- проєкції оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці показують, що вплив різних власних чисел на перехідні процеси є повністю різним;

- найменше власне число, яке є першим, ніколи не впливає на налаштування ААР, якщо адаптація починається з нульового значення вагового вектора. Це пов'язано з тим, що проекція оптимального вагового вектора на власний вектор, що відповідає цьому власному числу, завжди дорівнює нулю;

- у ситуації №1 найбільший вплив на перехідні процеси мають друге та третє власні числа, оскільки проекції оптимального вагового вектора на власні вектори, що їм відповідають, дорівнюють відповідно 0,3984 та 0,5725. Отже, можливо очікувати на значне загаювання перехідних процесів;

- у ситуації №2 найбільший вплив на перехідні процеси мають друге, третє та четверте власні числа, проекції на відповідні власні вектори яких становлять відповідно 0,3883, 0,3134 та 0,2978. У цій ситуації завдяки другому власному числу слід очікувати на істотне загаювання перехідних процесів;

- у ситуації №3 помітний вплив на перехідні процеси мають тільки друге та четверте числа і не слід очікувати на значне загаювання перехідних процесів;

- заводова ситуація №4 позначається тим, що в ній вплив на перехідний процес мають тільки третє та четверте власні числа і слід очікувати на найкращу швидкість адаптації з усіх чотирьох.

Але головним висновком є те, що для оцінювання вкладу певних власних чисел у процес адаптації слід обов'язково розглядати проекції оптимального вагового вектора на власні вектори, які їм відповідають. Це створює підґрунтя для синтезу інтегрального показника оцінювання процесу налаштування ААР з урахуванням як власних чисел, так і зазначених проекцій.

Синтез інтегрального показника оцінювання процесів налаштування в адаптивних антенних решітках

У попередньому розділі нами було встановлено два чинники, які мають бути включені до розрахунку інтегрального показника оцінювання характеристик налаштування адаптивних антенних решіток, що оптимізуються за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки: це власні числа кореляційної матриці ААР та проекції оптимального вагового вектора на власні вектори цієї матриці. Для цих показників існує проста геометрична інтерпретація їх впливу: власні числа показують крутість траєкторії, за якою здійснюється налаштування для певного власного числа, а проекції демонструють, який шлях, у відсотках тривалості оптимального вагового вектора, проходить траєкторія вагового вектора під час налаштування для відповідного власного числа.

У ситуаціях, наведених у табл. 1, слід кореляційної матриці є постійним для всіх випадків. Реально він може істотно змінюватися. Слід кореляційної матриці впливає на крок налаштування в градієнтному алгоритмі адаптації найшвидшого спуску, який згідно з [2] не може перевищувати значення, зворотне сліду кореляційної матриці.

З огляду на наведене інтегральний показник оцінювання характеристик налаштування адаптивних антенних решіток можна подати виразом

$$K_{\text{Int}} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \cos^2(w_{\text{opt}}, q_i)}{\text{tr}(R_{xx})}, \quad (1)$$

де $\text{tr}(R_{xx})$ — слід кореляційної матриці ААР; λ_i — власні числа кореляційної матриці; w_{opt} — оптимальний вектор ААР для певної заводої ситуації; q_i — власний вектор, що відповідає власному числу λ_i і $\cos^2(w_{\text{opt}}, q_i)$ — квадрат косинусу між відповідними комплексними векторами, або, інакше кажучи, квадрат напрямних косинусів.

Таким чином, синтезований інтегральний показник (1) під час оцінювання швидкості перехідних процесів враховує три головні фактори, що впливають на цей процес у разі використання градієнтних алгоритмів налаштування:

- власні числа кореляційної матриці ААР, що визначають складові вектора градієнта стосовно осей квадратичної робочої поверхні та показують потенційні проблеми зі швидкістю налаштування;

- квадрати напрямних косинусів оптимального вагового вектора на власні вектори, що показують який реальний вплив на процес налаштування для певної заводої ситуації мають власні числа кореляційної матриці ААР;

- слід кореляційної матриці, що визначає крок налаштування в градієнтному алгоритмі з огляду на загальну потужність сигналів в ААР.

Для з'ясування ефективності розробленого інтегрального показника потрібно провести комп'ютерне імітаційне моделювання для зазначених ситуацій і порівняти результати моделювання з тими, що ілюструє інтегральний показник.

**Дослідження коректності порівняльного оцінювання перехідних процесів в ААР
за допомогою розробленого інтегрального показника в різних заводових ситуаціях
із використанням імітаційного комп'ютерного моделювання**

Для з'ясування того, як працює винайдений інтегральний показник, спочатку розглянемо його в ідеальній ситуації для налаштування ААР. Такою є ситуація, коли заводові сигнали відсутні, а достатньо потужний корисний сигнал падає на решітку під кутом нуль градусів. Параметри такої ситуації для ААР з п'яти елементів наведено в табл. 2, а залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для заводової ситуації (див. табл. 2), зображено на рис. 1. Проаналізувавши дані на цьому рисунку, можна дійти висновку, що процес збігання до оптимального значення займає лічені ітерації, тоді як інтегральний показник майже дорівнює одиниці.

Таблиця 2

Характеристики ідеальної заводової ситуації налаштування ААР

Кут приходу корисного сигналу та його потужність	Значення власних чисел кореляційної матриці	Квадрати напрямних косинусів оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці	Потенційне відношення сигнал/завада, дБ	Значення інтегрального показника оцінювання характеристик налаштування
0°; 100	1,0 1,0 1,0 1,0 501,0	0 0 0 0 1	26,98	0,994

Такий характер перехідних процесів пояснюється даними, наведеними в табл. 2, з якої очевидно, що на процес адаптації впливає тільки одне власне число — 501 і яке майже дорівнює сліду кореляційної матриці решітки. Отже, інтегральний показник збігання перехідного процесу адекватно характеризує перехідні процеси в цьому випадку.

Для з'ясування ефективності розробленого інтегрального показника оцінювання характеристик налаштування ААР перевіримо його для заводових ситуацій, наведених у табл. 1. Для цього спочатку обчислимо значення показника для цих заводових ситуацій згідно з (1), а потім перевіримо, як він відбиває характеристики перехідних процесів через імітаційне комп'ютерне моделювання.

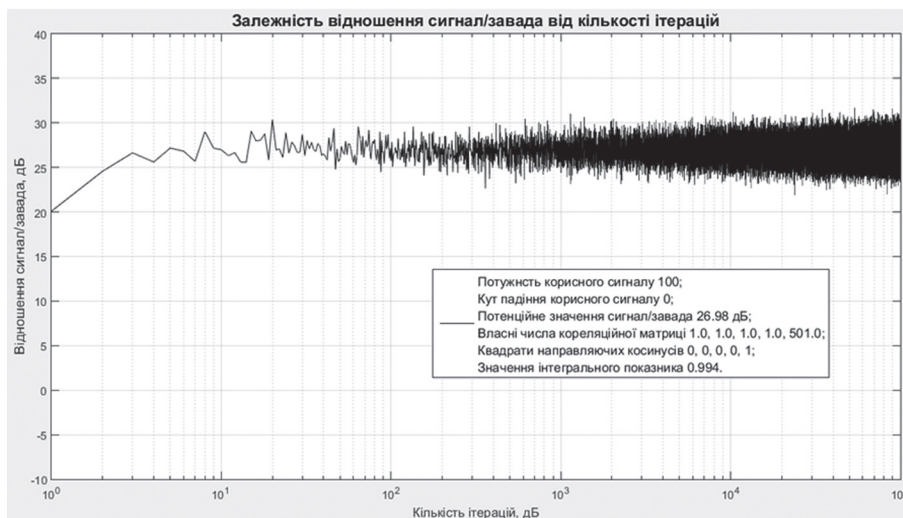


Рис. 1. Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для ідеальної ситуації

Розраховані значення синтезованого інтегрального показника для чотирьох заводових ситуацій із табл. 1 наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Значення інтегрального показника для чотирьох заводових ситуацій

Номер ситуації	1	2	3	4
Значення інтегрального показника оцінювання характеристик налаштування ААР	0,0147	0,094	0,1503	0,159

Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для заводової ситуації №1 з табл. 1 та табл. 3 ілюструє рис. 2.

Аналіз даних на рис. 2 наочно підтверджує зроблені раніше припущення щодо очікування значного загаювання перехідних процесів. Але вивчення квадратів напрямних косинусів розкриває природу такого загаювання, яке полягає в тому, що вплив відіграють тільки два власних числа: друге та третє. Загаювання на ділянці 1 пов'язано з досить малою крутістю робочої поверхні під час руху вздовж третього власного вектора, яка становить 32,3; водночас проекція на цей власний вектор є істотною — квадрат напрямного косинусу дорівнює 0,5725. При цьому мале значення другого власного числа, яке становить 1,2, хоча і призводить до істотного загаювання перехідних процесів на ділянці 2, похибка, яка при цьому виникає, є незначною і майже непомітною. Як результат зазначеного, синтезований інтегральний показник дорівнює дуже малому значенню — 0,0147.

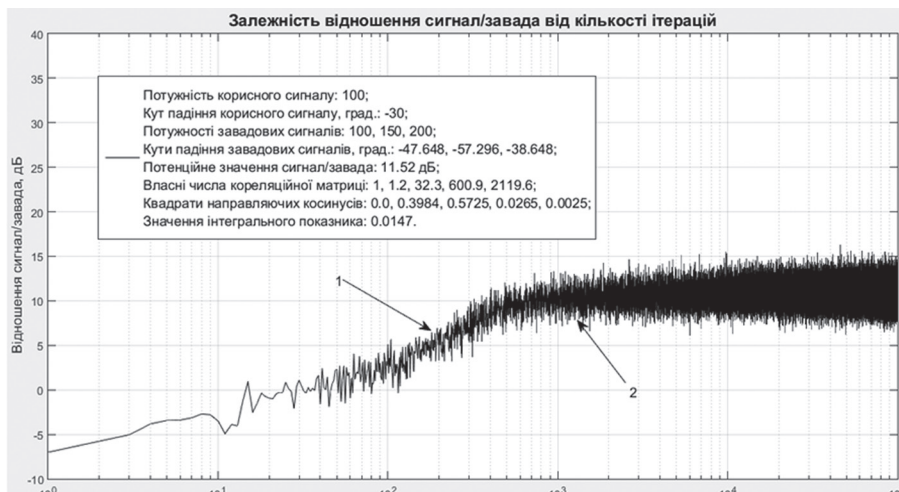


Рис. 2. Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для завадової ситуації №1 з табл. 1 і табл. 3

Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для завадової ситуації №2 з табл. 1 та табл. 3 ілюструє рис. 3.



Рис. 3. Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для завадової ситуації №2 з табл. 1 і табл. 3

У завадовій ситуації №2 головний вплив на перехідні процеси виказують друге, третє та четверте власні числа, напрямні косинуси оптимального вагового вектора на власні, вектори яких дорівнюють відповідно 0,3883, 0,3134 та 0,2978.

На рис. 3 ділянка 1 характеризує вплив другого та третього власних чисел кореляційної матриці і являє собою ділянку швидкого налаштування. Але друге власне число, що дорівнює 2,4, є відповідальним за дуже повільний процес налаштування на ділянці 2. При цьому втрати становлять приблизно три децибелли з дуже тривалою траєкторією руху вагового вектора. Як результат, значення інтегрального показника хоча і зросло у кілька разів порівняно з попередньою ситуацією, все одно залишається низьким — 0,094.

Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для завадової ситуації №3 з табл. 1 та табл. 3 зображено на рис. 4.

Аналіз даних, наведених на рис. 4, дає можливість стверджувати, що на перехідні процеси вплив мають тільки друге та четверте власні числа, що становлять відповідно 4,0 та 486,1. Це зрозуміло з аналізу квадратів напрямних косинусів оптимального вагового вектора на відповідні власні вектори — 0,1542 та 0,8291. Наочно видно з рис. 4, що ділянка 1 відповідає четвертому власному числу, яке має найбільшу швидкість налаштування, тоді як ділянка 2 відображає фазу процесу налаштування, що визначається другим власним числом. Цілком зрозуміло, чому значення синтезованого інтегрального показника для цієї заводової ситуації зросло до 0,1503 порівняно з попередньою заводою ситуацією.



Рис. 4. Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для заводової ситуації №3 з табл. 1 і табл. 3

Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для заводової ситуації №4 з табл. 1 та табл. 3 наведено на рис. 5.



Рис. 5. Залежність відношення сигнал/завада від кількості ітерацій для заводової ситуації №4 з табл. 1 і табл. 3

У заводоювій ситуації №4, яку зображено на рис. 5, вплив на швидкість процесу налаштування мають тільки третє та четверте власні числа кореляційної матриці. Вони обидва є великими і, відповідно, формують високу швидкість процесу збігання на ділянці 1. Усунення тривалого «провисання» верхньої частини кривою налаштування пояснюється відсутністю будь-якого впливу другого власного числа за рахунок дуже малої проекції оптимального вагового вектора на відповідний цьому власному числу власний вектор. Значення інтегрального показника, що становить 0,159, є трохи кращим, ніж у попередньому випадку завдяки саме відсутності цього «провисання» на 3 дБ, хоча до рівня 22 дБ у попередньому випадку процес адаптації наростає швидше на 20–25-й ітерації. Але показник є інтегральним і оцінює перехідний процес загалом.

У цілому, можна дійти висновку, що згідно з даними на рис. 1, рис. 2, рис. 3, рис. 4 та рис. 5 синтезований інтегральний показник дуже гарно оцінює перехідні процеси і дає можливість зрозуміти, як і якою мірою впливають на процес адаптації власні числа кореляційної матриці решітки та відповідні власні вектори.

ВИСНОВКИ

Швидкість налаштування вагового вектора ААР до оптимального значення згідно з вибраним критерієм оптимізації та градієнтним алгоритмом адаптації є одним із головних показників роботи таких решіток. У статті запропоновано універсальний інтегральний показник оцінювання характеристик налаштування адаптивних антенних решіток без проведення відповідного комп'ютерного імітаційного моделювання. Інтегральний показник набуває значення від одиниці, що відповідає найшвидшому процесу адаптації, до нуля, що відображає відсутність адаптації, і будується з урахуванням розподілу власних чисел кореляційної матриці решітки, квадратів напрямних косинусів оптимального вагового вектора на власні вектори кореляційної матриці антенної решітки та сліду цієї кореляційної матриці. Під час проведення дослідження встановлено, що не всі власні числа кореляційної матриці решітки однаковою мірою впливають на процес адаптації і розроблений метод бере цей факт до уваги.

Комп'ютерне імітаційне моделювання для різних заводових ситуацій дало можливість перевірити, що розроблений інтегральний показник досить коректно дає змогу спрогнозувати швидкість перехідних процесів в адаптивних антенних решітках та здійснити їх порівняльне оцінювання.

Власні числа та вектори кореляційної матриці ААР, квадрати напрямних косинусів на ці власні вектори та слід кореляційної матриці дозволяють ясно зрозуміти фактори, які впливають на процес адаптації і природу відповідних перехідних процесів в решітці.

Результати досліджень можуть бути використані в процесі розроблення ААР з градієнтними алгоритмами налаштування та під час проведення порівняльного аналізу їх характеристик у різних заводових ситуаціях.

Список використаної літератури

1. *Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития* / И. А. Генко, В. Ф. Олейник, Ю. Д. Чайка, А. В. Бондаренко. Киев: Екмо, 2009. 672 с.
2. **Robert A. Monzingo, Randy L. Haupt, Thomas W. Miller.** *Introduction to adaptive arrays, 2nd ed.* New York: SciTech Publishing, Inc., 2011. 553 p.
3. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочник. 2-е изд., перераб. и доп.* / под ред. Шурмана Я. Д. Москва: Радиотехника, 2007. 512 с.
4. **Volakis J.** *Antenna Engineering Handbook. 5th ed.* New York: McGraw Hill Professional, 2018. 1755 p.
5. **Robert J. Mailloux.** *Phased Array Antenna Handbook. 3rd ed.* Boston: Artech House, 2018. 506 p.
6. **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).* Kyiv, 2019. P. 190.
7. *Studying behavior of the Gradient Signal Processing Algorithm for Adaptive Antenna Arrays in Telecommunication Environment* / O. Pliushch, V. Vyshnivskiy, S. Toliupa, A. Rybydajlo // *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET - 2020).* (Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020). Lviv-Slavske, 2020. P. 107.

А. Г. Плющ, В. В. Вишнеvский, С. В. Толюпа, С. В. Прокопов, С. М. Ищеряков

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК НАСТРОЙКИ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Одной из главных характеристик работы адаптивных антенных решеток с градиентным алгоритмом наискорейшего спуска в телекоммуникационных сетях информационных систем является скорость их настройки. Традиционно оценка переходных процессов осуществляется путем компьютерного имитационного моделирования. Среди основных недостатков такого подхода есть существенные затраты времени на создание соответствующей модели, большой объем вычислений который приводит к достаточно длительному времени проведения необходимых математических операций и ограниченные возможности касательно интерпретации результатов моделирования. В работе предложен интегральный показатель оценки характеристик настройки адаптивных антенных решеток, которые оптимизируются по критерию минимума среднеквадратической ошибки и который не требует проведения затратного имитационного моделирования переходных процессов. Интегральный показатель принимает значения от единицы, что соответствует самому быстрому процессу адаптации, до нуля, что показывает на отсутствие адаптации, и строится с учетом распределения собственных чисел корреляционной матрицы решетки, квадратов направляющих косинусов оптимального весового вектора на собственные вектора корреляционной матрицы антенной решетки и следу этой корреляционной матрицы. Путем компьютерного имитационного моделирования было установлено, что разработанный показатель позволяет корректно спрогнозировать скорость переходных процессов в адаптивных антенных решетках и провести их сравнительную оценку для разных помеховых ситуаций. Дополнительно данные вычислений, которые используются для получения этого показателя, позволяют наглядно пояснить характер переходных процессов в адаптивной антенной решетке.

Ключевые слова: телекоммуникационные сети; адаптивные антенные решетки; интегральный показатель; процесс адаптации; компьютерное моделирование; информационные системы.

O. G. Pliushch, V. V. Vyshnivskiy, S. V. Toliupa, S. V. Prokopov, S. M. Ishcheryakov

INTEGRAL INDICATOR OF ADJUSTMENT PARAMETERS ESTIMATION OF ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS FOR TELECOMMUNICATION NETWORKS OF INFORMATION SYSTEMS

Adjustment speed is one of the main operation features of adaptive antenna arrays with the steepest descent gradient algorithm in telecommunication networks of information systems. Traditionally, estimation of the transient processes involves a computer simulation of the adaptive antenna array according to the selected noise environment. Substantial time required to create a respective model, big computational load that leads to quite a long period of time for performing required mathematical operations, as well as limited possibilities of simulation results interpretations are among the main drawbacks of the traditional approach. The paper proposes an integral indicator of adjustment parameters estimation of adaptive antenna arrays optimized according to the root-mean-square criterion and that does not require performing of the time consuming computer simulation of the transient processes. Integral indicator assumes values from 1, which corresponds to the quickest adaptation process, to 0, which indicates an absence of adaptation, and is built with account of the eigenvalues distribution of the array correlation matrix, squares of direction cosines of the optimal weight vector on the eigenvalues of the antenna array correlation matrix and the trace of this matrix. Computer simulation helped to establish that the designed indicator permits to correctly predict the speed of the transient processes in adaptive antenna arrays and perform their comparative analysis for different noise environments. Additionally, computation data, which are used for obtaining this indicator, allow us to clearly explain the character of the transient processes in the adaptive antenna arrays.

Keywords: telecommunication networks; adaptive antenna arrays; integral indicator; adaptation process; computer simulation; information systems.

