

АЛГОРИТМ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТКАХ

Pliushch O. G., Andrushchenko M. V., Shedii K. K. Signal processing algorithm in adaptive antenna arrays. Signal processing algorithms in adaptive antenna arrays are analyzed with respect to their application in mobile telecommunication systems. It is established that both in literature and in practice insufficient attention is paid to search for and design of such simple adaptation algorithms that do not require presence of the reference signal. Gradient method of adaptation is considered and its limitations are exposed. It is shown that the gradient method requires a reference signal that can be presented as the signal in a selected antenna element or a reference signal generated in the antenna array. A simple algorithm of antenna array adaptation is deduced that operates in the absence of the reference signal. Simulation of adaptive antenna arrays with the designed algorithm in different situations is carried out. Efficiency of the proposed algorithm is confirmed in difficult interference environments.

Keywords: mobile telecommunication systems, adaptive antenna arrays, gradient adaptation algorithms, computer simulation, signal-to-interference ratio.

Плющ О. Г., Андрущенко М. В., Шедій К. К. Алгоритм обробки сигналів в адаптивних антенних решітках. Проаналізовані алгоритми обробки сигналів в адаптивних антенних решітках стосовно їх використання в системах мобільного зв'язку. Встановлено, що в літературі та при практичній реалізації не приділяється достатньої уваги пошуку та розробці таких простих алгоритмів налаштування, які не потребують присутності опорного сигналу. Розроблено простий алгоритм налаштування антенної решітки що працює у відсутності опорного сигналу. Проведене імітаційне моделювання адаптивних антенних решіток з застосуванням розробленого алгоритму в різних ситуаціях. Підтверджена ефективність запропонованого алгоритму у складній завадовій обстановці.

Ключові слова: системи мобільного зв'язку, адаптивні антенні решітки, градієнтні алгоритми налаштування, імітаційне моделювання, відношення корисний сигнал/завада.

Плющ А. Г.; Андрущенко М. В. Алгоритм обработки сигналов в адаптивных антенных решетках. Проанализированы алгоритмы обработки сигналов в адаптивных антенных решетках касательно их использования в системах мобильной связи. Установлено, что в литературе и при практической реализации не уделяется достаточного внимания поиску и разработке таких простых алгоритмов настройки, которые не нуждаются в присутствии опорного сигнала. Разработан простой алгоритм настройки антенной решетки, который работает в отсутствие опорного сигнала. Проведено имитационное моделирование адаптивных антенных решеток с использованием разработанного алгоритма в разных ситуациях. Подтверждена эффективность предложенного алгоритма в сложной помеховой обстановке.

Ключевые слова: системы мобильной связи, адаптивные антенные решетки, градиентные алгоритмы настройки, имитационное моделирование, отношение полезный сигнал/помеха.

Вступ

Постановка задачі. Адаптивні антенні решітки (ААР) знаходять широке застосування для вирішення різноманітних задач в таких областях науки і техніки як телекомунікації, радіо та гідролокація. Існує певна кількість достатньо простих і тим не менш досить ефективних алгоритмів налаштування таких решіток. Але майже всі вони вимагають присутності в тому чи іншому вигляді опорного сигналу, що обмежує їх область застосування. В деяких випадках опорний сигнал або неможливо створити взагалі, або це пов'язано з великими труднощами при практичній реалізації. Виходячи з наведеного, важливою є задача пошуку та оцінка ефективності простих алгоритмів налаштування ААР, які не потребують наявності опорного сигналу.

Аналіз літературних джерел. С самого початку розробки та практичного застосування ААР питання покращення їх характеристик та розробки нових алгоритмів для їх налаштування широко висвітлюються в науково-технічній літературі [4]. Зі зростанням

обчислювальних можливостей процесорів сигналів, все більш складні алгоритми, зокрема пов'язані з обертанням кореляційної матриці, стають такими що можуть бути реалізовані на практиці [2,5,6]. Тим не менш, прості градієнтні алгоритми не втрачають своєї привабливості для розробників ААР [2].

Зі стрімким поширенням мобільного зв'язку, ААР починають знаходити широке застосування в забезпеченні зв'язку між мобільними та базовими станціями [1], особливо в системах четвертого та п'ятого покоління.

На жаль, в літературі не проведено вичерпного аналізу того, які алгоритми доцільно використовувати в ААР для систем мобільного зв'язку. Так, хоча в [1] і вказується що ААР дають суттєве покращення показників зв'язку в бездротових мережах, жодного адаптивного алгоритму не приведено і не надано будь-яких практичних рекомендацій щодо вибору цього алгоритму.

Невирішені питання. З аналізу літературних джерел є цілком слушним припустити, що розробці алгоритмів налаштування ААР в системах мобільного зв'язку не приділено достатньо уваги і цей напрям потребує подальшого опрацювання. Нагальною є розробка простих адаптивних алгоритмів налаштування ААР, які не потребують присутності опорного сигналу.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є отримання алгоритму налаштування ААР який не потребує наявності опорного сигналу та дослідження його ефективності.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові задачі:

- аналіз існуючих алгоритмів та синтез алгоритму налаштування ААР який не потребує присутності опорного сигналу;
- розробка імітаційної моделі ААР на основі розробленого алгоритму налаштування;
- моделювання ААР в різних заводових умовах та аналіз ефективності розробленого алгоритму.

1. Аналіз існуючих алгоритмів налаштування ААР

Використання того чи іншого алгоритму налаштування ААР визначається розміром антенної решітки, необхідними показниками її ефективності та, особливо, наявним обчислювальним ресурсом [2,3]. Основними з існуючих алгоритмів можливо вважати градієнтні алгоритми, алгоритми безпосереднього обертання кореляційної матриці, рекурентні методи, та алгоритми випадкового пошуку [2,3]. Найбільш простими в реалізації є градієнтні алгоритми, так як вони потребують найменших обчислювальних витрат і при цьому забезпечують прийнятні показники якості.

Розглянемо градієнтний алгоритм найшорішого спуску при наявності опорного сигналу для методу середньоквадратичної помилки [2]. Структурна схема вузько-смугової решітки при відомому опорному або корисному сигналі наведена на Рис. 1., де $x_i(t)$ - сигнал прийнятий i -им елементом решітки, w_i - ваговий коефіцієнт у i -тому каналі, $d(t)$ - опорний сигнал, та $\varepsilon(t)$ - сигнал помилки.

Для антенної решітки на Рис.1. математичне очікування квадрата помилки визначається формулою [2]:

$$E\{\varepsilon^2(t)\} = S - 2\mathbf{w}^T \mathbf{r}_{xd} + \mathbf{w}^T \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \quad (1)$$

де: \mathbf{r}_{xd} - вектор кореляції прийнятих сигналів решітки $x_i(t)$ та опорного сигналу $d(t)$;

\mathbf{R}_{xx} - кореляційна матриця прийнятих сигналів;

S - потужність корисного сигналу.

Відомо [2], що задача налаштування антенної решітки Рис.1. полягає в мінімізації (1) за рахунок вибору вагового вектору \mathbf{w} , при цьому мінімум (1) досягається коли градієнт середньоквадратичної помилки дорівнює нулю:

$$\nabla_{\mathbf{w}} \overline{(\varepsilon^2)} = 0 \quad (2)$$

Градієнт (1) визначається формулою:

$$\nabla_{\mathbf{w}} \overline{(\varepsilon^2)} = -2\mathbf{r}_{\text{xd}} + 2\mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w}, \quad (3)$$

а оптимальний ваговий вектор співвідношенням:

$$\mathbf{w}_{\text{ОПТ}} = \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \mathbf{r}_{\text{xd}} \quad (4)$$

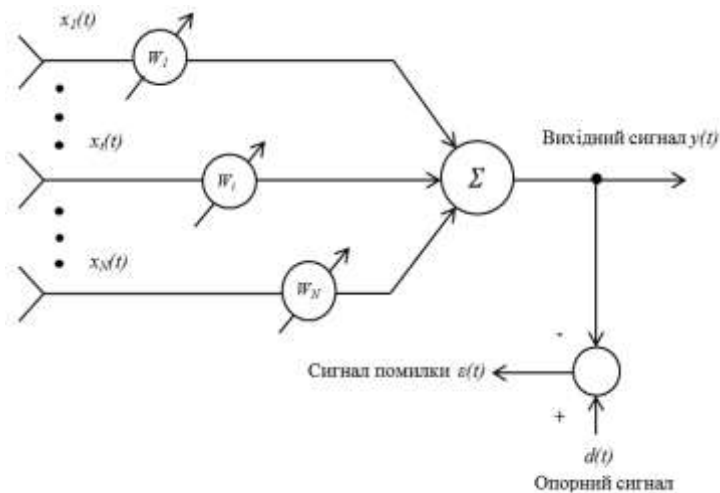


Рис. 1. Структурна схема вузько-смугової антенної решітки при відомому корисному сигналі

Вираз (4) є добре відомим рівнянням Вінера-Хопфа у матричній формі.

Градієнтний алгоритм найскорішого спуску для налаштування антенної решітки Рис.1. може бути представлений наступною ітераційною формулою:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \Delta_s \nabla_{\mathbf{w}} [(\varepsilon^2(k))] \quad (5)$$

де: $\mathbf{w}(k+1)$ - нове значення вагового вектору в відлік часу $(k+1)T$;

$\mathbf{w}(k)$ - значення вагового коефіцієнта в відлік часу kT ;

Δ_s - константа, що визначає крок налаштування.

З урахуванням (3), вираз (5) можливо переписати наступним чином:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - 2\Delta_s (\mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w}(k) - \mathbf{r}_{\text{xd}}) \quad (6)$$

В (6) потрібно обчислювати значення градієнта у кожній точці при налаштуванні, а для цього необхідно спочатку оцінити кореляційну матрицю та вектор кореляції прийнятих сигналів решітки $x_i(t)$ та опорного сигналу $d(t)$.

Для уникнення цього і відповідного спрощення процесу налаштування замість градієнта в (6) використовується його оцінка, а не саме значення [2]. В такому випадку зміни вагового вектору можливо представити у вигляді:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \Delta_s \overset{\circ}{\nabla}_{\mathbf{w}} [(\varepsilon^2(k))] \quad (7)$$

де: $\overset{\circ}{\nabla}_{\mathbf{w}} [(\varepsilon^2(k))]$ - являє собою оцінку градієнта.

В якості оцінки градієнта зазвичай використовується наступна [2]:

$$\nabla_w^0 = -2\varepsilon(k)\mathbf{x}(k) \tag{8}$$

З урахуванням (8), рекурентна формула (6) у комплексному вигляді буде мати наступний вираз:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\Delta_s \varepsilon(k)\mathbf{x}^*(k) \tag{9}$$

де: * означає комплексне спряження.

Формула (9) має багато переваг та широко використовується для налаштування антенних решіток у різних галузях техніки. Але, як було показано вище, вона вимагає наявності опорного сигналу. Нажаль, цю вимогу не завжди можливо задовольнити, і це є її суттєвим недоліком.

2. Синтез градієнтного алгоритму який не потребує наявності опорного сигналу

На Рис. 2 представлена схема вузько-смугової антенної решітки що налаштована на корисний сигнал і не потребує наявності опорного сигналу у явному вигляді. Налаштування відбувається за рахунок присутності фазообертачів в кожному каналі, і при цьому вважається, що напрямок приходу корисного сигналу відомий.

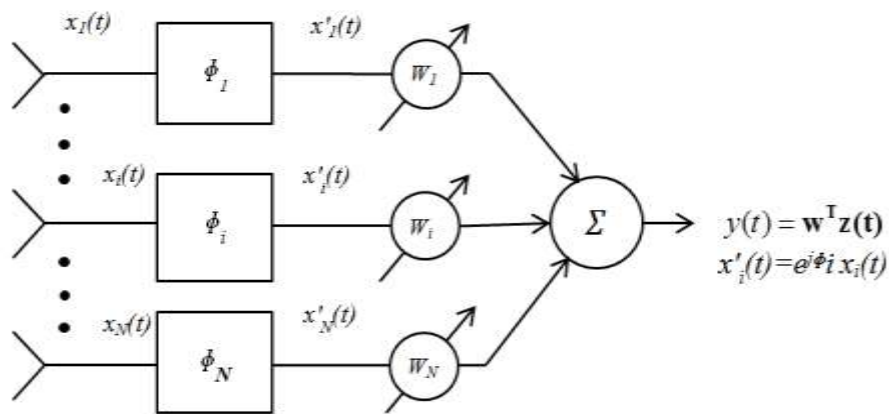


Рис. 2. Структурна схема вузько-смугової антенної решітки що налаштована на корисний сигнал

У випадку, коли напрямок приходу корисного сигналу є відомим, можливо застосувати критерій мінімізації дисперсії (потужності) сигналу на виході решітки.

Вектор сигналів з елементів антенної решітки після фазообертачів буде мати наступний вигляд:

$$\mathbf{x}'(t) = \Phi\mathbf{x}(t) \tag{10}$$

де: Φ – діагональна матриця типу

$$\Phi = \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\phi_N} \end{pmatrix}$$

Дисперсія або потужність шуму на виході антенної решітки при перетворенні (10) не змінюється і дорівнює:

$$\text{var}[y(t)] = \mathbf{w}^T \mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \mathbf{w} = \mathbf{w}^T \mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \mathbf{w} \tag{11}$$

Критерій мінімуму дисперсії шуму полягає у мінімізації (11) при обмеженні:

$$\mathbf{w}^T \mathbf{1} = 1$$

де: $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$.

Для вирішення цієї задачі мінімізації створюється модифікований критерій ефективності

$$\mathfrak{R}_{\text{мод}} = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w} + \lambda [1 - \mathbf{w}^T \mathbf{1}] \quad (12)$$

де: λ - множник Лагранжа.

Для винайдення оптимального вектору коефіцієнтів в (12) потрібно знайти градієнт. Він дорівнює:

$$\nabla_{\mathbf{w}} \mathfrak{R}_{\text{мод}} = \mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w} - \lambda \mathbf{1} \quad (13)$$

З урахуванням обмеження, що накладається на коефіцієнти решітки, оптимальний вектор в (13), коли градієнт дорівнює нулю, буде мати вигляд [2]:

$$\mathbf{w}_{\text{мод}} = \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \lambda \mathbf{1} \quad (14)$$

$$\text{де: } \lambda = \frac{1}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \mathbf{1}} \quad (15)$$

При цьому слід додати що λ відповідає значенню дисперсії шуму на виході решітки Рис.2. при налаштуванні на оптимальний вектор коефіцієнтів (14) [2].

Наведені вище формули дозволяють отримати градієнтний алгоритм адаптації решітки без необхідності формування опорного сигналу.

Градієнтний алгоритм (5) може бути записаний для антенної решітки зображеної на Рис.2 з урахуванням (13) та (15) у наступному вигляді:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \Delta_s \left(\mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}_{\text{xx}}^{-1} \mathbf{1}} \right) \quad (16)$$

Звичайно для використання процедури (16) потрібно проводити визначення градієнту на кожному кроці ітерацій. Але, як і в попередньому випадку, можливо перейти від визначення градієнту до оцінки градієнту. Оцінка градієнту може бути отримана за рахунок використання для цієї оцінки тільки одного відліку сигналів. Таким чином, замість

$$\mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{w}(k) - \mathbf{r}_{\text{xd}}$$

можливо використовувати

$$\mathbf{x}'(k) \mathbf{x}'^T(k) \mathbf{w}(k) - y(k) \bullet y(k)^* \mathbf{1} \quad (17)$$

В (17) кореляційна матриця представлена у вигляді продукту двох векторів сигналів після фазообертачів, а потужність сигналу на виході у вигляді потужності одного відліку вихідного сигналу.

Виходячи з наведеного, в кінцевому вигляді алгоритм що пропонується для використання в адаптивній антенній решітці, що зображена на Рис.2, буде мати наступний вигляд:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \Delta_s (\mathbf{x}'(k) \mathbf{x}'^T(k) \mathbf{w}(k) - y(k) \bullet y(k)^* \mathbf{1}) \quad (18)$$

Для оцінки якості роботи розробленого алгоритму проведемо його імітаційне моделювання з застосуванням середовища Matlab.

2. Імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання було проведено для лінійної вузько-смугової антенної решітки з наступними параметрами: кількість елементів в антенній решітці – 9, відстань між елементами – половина тривалості хвилі, потужність внутрішнього шуму в кожному каналі решітки - одиниця.

Для оцінки перехідного процесу налаштування використовувалося відношення корисний сигнал/завада на виході решітки. Для моделювання шумових процесів застосовувалися

некорельовані відліки розподілені по нормальному закону. Потужність заводових сигналів вимірювалася в умовних одиницях відносно потужності внутрішнього шуму.

Результати моделювання процесу адаптації антенної решітки за допомогою розробленого алгоритму (18) наведені на Рис.3. та Рис.4.

В заводській ситуації на Рис.3 було імітовано три сторонніх джерела шумових сигналів з кутами падіння відносно нормалі до розкриття решітки -28.648 , -57.296 та 57.269 градусів, з відповідними рівнями потужності відносно внутрішніх шумів в каналах 100, 100 та 200 одиниць. Кут падіння корисного сигналу вважався рівним 0 градусів.

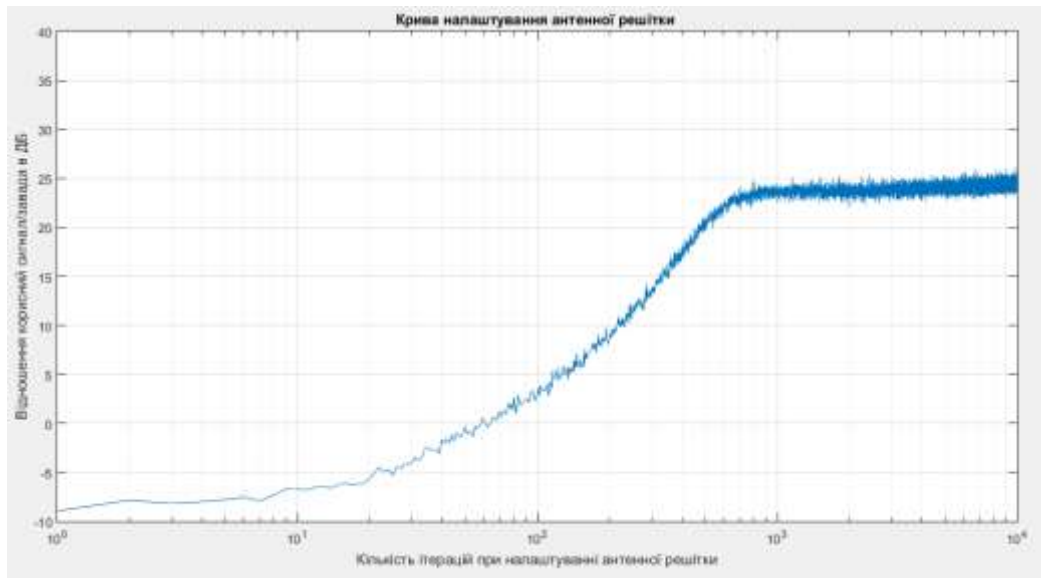


Рис. 3. Результати імітаційного моделювання процесу адаптації антенної решітки з кутом приходу корисного сигналу нуль градусів.

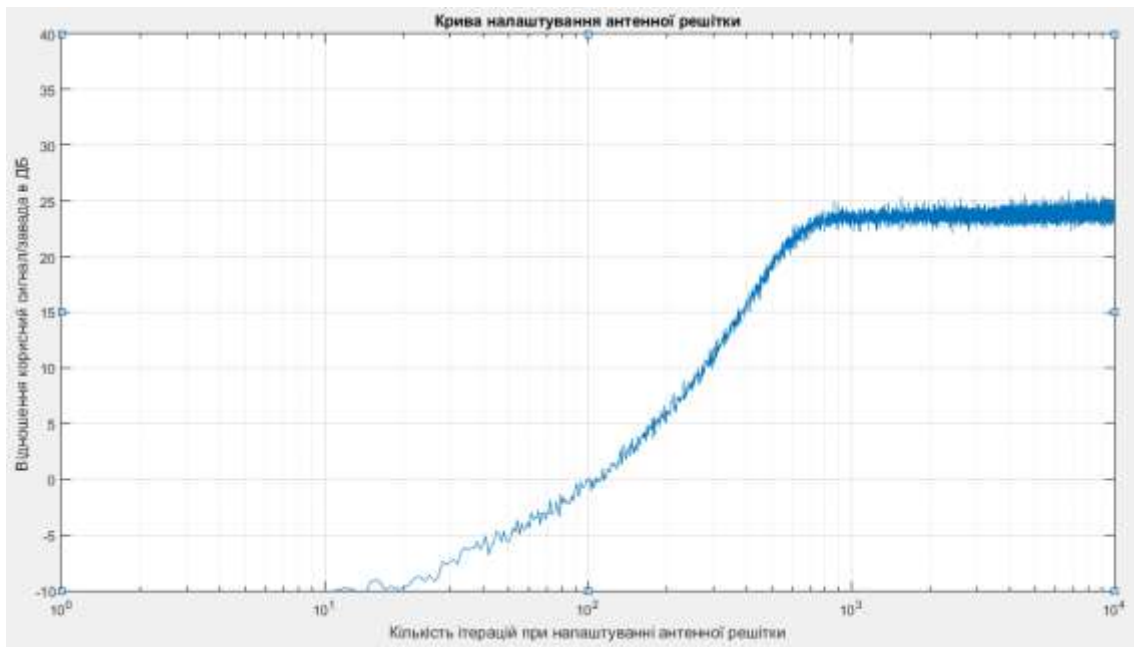


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання процесу адаптації антенної решітки з кутом приходу корисного сигналу 60 градусів.

Для отримання кривої налаштування проводилося налаштування по 10 000 відліків вхідних сигналів решітки, при цьому усереднення відношення корисний сигнал/завада відбувалося по 100 незалежним реалізаціям.

Потенційно можливе відношення корисний сигнал/завада, обчислене по ідеальній кореляційній матриці за відомими формулами [2] для завадової ситуації на Рис.3. складає приблизно 29.5 дБ.

В завадовій ситуації на Рис.4 було також імітовано три сторонніх джерела шумових сигналів. Але кути падіння відносно нормалі до розкриття решітки були іншими -28.648, -57.296 та 0 градусів. Потужності завадових сигналів відносно внутрішніх шумів в каналах також відрізняються і складають відповідно: 200, 300 та 250 одиниць. Важливо підкреслити, що кут падіння корисного сигналу в цьому випадку складає 60 градусів.

Для отримання кривої налаштування також проводилося налаштування по 10 000 відліків вхідних сигналів решітки, при цьому усереднення відношення корисний сигнал/завада відбувалося по 100 незалежним реалізаціям.

В завадовій ситуації наведеній на Рис.4. потенційно можливе відношення корисний сигнал/завада, обчислене по ідеальній кореляційній матриці складає приблизно 29.3 дБ.

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволяє зробити наступні висновки:

1. Алгоритм (18) продемонстрував свою працездатність, що свідчить про коректність процедури як його створення так і зроблених при цьому припущень.
2. Результати моделювання відповідають очікуваним результатам стосовно значення відношення корисний сигнал/завада в сталому режимі (після налаштування). Відмінність відношення корисний сигнал/завада в сталому режимі менше від потенціального приблизно на 4 дБ.
3. Швидкість адаптації досить велика і складає приблизно 800-900 відліків, що свідчить про можливість застосування алгоритму в антенних решітках в радіолокації та мобільному зв'язку.

Висновки

Адаптивні антенні решітки знаходять все більше застосування в системах мобільного зв'язку, особливо в четвертому та п'ятому поколіннях. Існують прості та ефективні градієнтні алгоритми найшвидшого спуску, які дозволяють здійснювати налаштування антенних решіток. Головним недоліком цих алгоритмів є необхідність мати опорний (корисний) сигнал для здійснення процедури адаптації. Нажаль, можливість згенерувати потрібний опорний сигнал не завжди існує в реальних системах мобільного зв'язку.

В роботі розроблено градієнтний алгоритм для адаптивної антенної решітки, який не потребує наявності опорного сигналу. Налаштування антенної решітки на корисний сигнал відбувається за відомим кутом надходження цього сигналу, а придушення небажаних завадових сигналів за допомогою алгоритму мінімізації дисперсії шуму.

Моделювання розробленого алгоритму підтвердило його працездатність та ефективність.

Розроблений алгоритм може бути впроваджений в системах мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь.

Список використаної літератури

1. Гепко И. А., Олейник В. Ф., Чайка Ю. Д., Бондаренко А. В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития. – Киев: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – Москва: Радио и связь, 1986. – 448 с.
3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Ширмана Я. Д. – Москва: Радиотехника, 2007. – 512 с.
4. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К. Н. Трофимова. Том. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. П. И. Дудника. – Москва: «Сов. Радио», 1977. – 408 с.
5. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – Москва: Радио и связь, 1989. – 440 с.
6. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех – Москва: Радио и связь, 1981. – 416 с.

Автори статті

Плющ Олександр Григорович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Андрущенко Максим Віталійович – студент магістерської програми підготовки, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Шедій Костянтин Костянтинівич – студент бакалаврської програми підготовки, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Plushch Oleksandr Grygorovich – candidate of Science (technic), assistant professor, professor of Mobile and Videoinformational Technologies chair, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Andrushchenko Maksym Vitalievich – student of master's program, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Shedii Kostyantyn Kostyantynovich – student of bachelor's program, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 25.06.2019 р. Рецензент: д.т.н., доцент О.Л. Недашківській