

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ В АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТКАХ

У статті розглядаються процеси адаптивної фільтрації в адаптивних антенних решітках. Проведено аналіз алгоритмів адаптивної фільтрації, одним із напрямків їх удосконалення визначено алгоритм на базі вирішуючої системи на основі нейронної мережі. Порівняльний аналіз алгоритмів LMS та RLS, показав, що результат фільтрації залежить від багатьох факторів і відрізняються швидкістю сходимості і обчислювальною складністю. У якості критеріїв порівняння були обрані коефіцієнт подавлення завади, швидкість сходження в сталому режимі і обчислювальна складність. Метою роботи є дослідження результатів удосконалення системи автоматичного керування адаптивних антенних решіток, що відрізняється від існуючих застосованим нейронним регулятором для алгоритмізації процесу управління діаграмою спрямованості антен. Процес управління антенною системою пропонується здійснювати в два етапи: на першому етапі запропонованого алгоритму здійснюється параметризація вихідних станів модулів антенної решітки, за допомогою нейронної мережі; другий етап являє собою обробку отриманих вихідних станів адаптивної антенної решітки, для навчання нейрорегулятора і формування керуючих сигналів на кожен із прийомо-передавальних модулів адаптивної антенної решітки для керування діаграмою спрямованості.

Беляков Р.О., Фесенко А.Д., Радзівілов Г.Д., Цатурян А.Г. Анализ применения алгоритмов адаптивной фильтрации сигналов в адаптивных антенных решетках. В статье рассматриваются процессы адаптивной фильтрации в адаптивных антенных решетках. Проведен сравнительный анализ алгоритмов адаптивной фильтрации, одно из направлений их усовершенствования предложено алгоритм в основу которого положена решающая система на основе нейронной сети. Сравнительный анализ алгоритмов LMS и RLS, показал, что результат фильтрации зависит от многих факторов и отличаются скоростью сходимости и вычислительной сложности. В качестве критериев сравнения были выбраны коэффициент подавления помехи, скорость сходимости в установившемся режиме и вычислительная сложность. Целью работы является исследование результатов совершенствования системы автоматического управления адаптивных антенных решеток, отличающийся от существующих примененным нейронным регулятором для алгоритмизации процесса управления диаграммой направленности антенн. Процесс управления антенной системой предлагается осуществлять в два этапа: на первом этапе предложенного алгоритма осуществляется параметризация выходных состояний модулей антенной решетки, с помощью нейронной сети; второй этап представляет собой обработку полученных исходных состояний адаптивной антенной решетки, для обучения нейрорегулятора и формирования управляющих сигналов на каждый из приемопередающих модулей адаптивной антенной решетки для управления диаграммой направленности.

R. Bieliakov, O.Fesenko, H.Radzivilov, O.Tsaturyan Analysis of the application of algorithms for adaptive filtering of signals in adaptive antenna arrays. The article deals with the processes of adaptive filtration in adaptive antenna arrays. A comparative analysis of adaptive filtration algorithms has been carried out, directions of their improvement has been determined. A comparative analysis of adaptive filtering algorithms was carried out; one of the directions for their improvement was proposed a algorithm based on a crucial system with neural network. A comparative analysis of the LMS and RLS algorithms has shown that the result of the filtration depends on many factors and differ in the rate of convergence and computational complexity. As the comparison criteria, the interference suppression factor, the convergence rate in steady state and the computational complexity were selected. The purpose of the work is to study the results of improving the system of automatic control of adaptive antenna arrays, which differs from the existing neural controller used to algorithm the process of controlling the antenna directivity pattern. The process of controlling the antenna system is proposed to be carried out in two stages: in the first stage of the proposed algorithm, the parameterization of the initial states of the antenna array modules, using the neural network; the second stage is the processing of the received output states of the adaptive antenna lattice, for training the neuro-regulator and the formation of control signals on each of the receiver-transmitting modules of the adaptive antenna array for controlling the directional diagram.

Ключові слова: алгоритм адаптивної фільтрації, адаптивна антенна решітка, система радіозв'язку.

Постановка завдання. Переваги адаптивних антенних решіток (ААР) перед антенами інших типів [1] обумовлюють підвищений інтерес їх використання у складі систем радіозв'язку (СРЗ). ААР характеризуються здатністю підвищення якості прийому сигналів шляхом подавлення шумових характеристик сигналів, що знаходяться в одній смузі частот з

корисним сигналом [2 – 4]. ААР, у загальному вигляді, є переналагоджуваним просторовим фільтром, амплітудно-кутова характеристика якого, тобто діаграма спрямованості (ДС), змінюється у відповідності до умов функціонування (просторово-часових характеристик джерела сигналів).

Основним завданням проектування адаптивних антен є вибір алгоритмів фільтрації для здійснення керування діаграмоутворенням. В результаті обробки дискретним фільтром вхідного дискретного сигналу, утворюється вихідний сигнал що порівнюється із базовим, а різниця між ними утворює сигнал помилки [4, 5]. Завданням адаптивного фільтрації в загальному випадку є мінімізація помилки відтворення базового сигналу.

На сьогодні для таких завдань широко застосовують властивості в галузі машинного навчання (нейронні мережі)

Аналіз наукових праць предметної області. У роботах [1, 4] розкрито методіку підвищення швидкодії та динамічної точності систем управління діаграмою направленості ААР, із використанням методів компенсації внутрішніх середньоквадратичних помилок системи діаграмо утворення; розкрито метод вимірювання обвідної співвідношення сигнал/шум з метою забезпечення адаптивного виділення оптимального каналу прийому. Зокрема у статтях [2 – 4, 8, 9] показано ряд напрямів удосконалення способів підвищення відношення сигнал/шум за рахунок оптимального діаграмоутворення ААР за використання алгоритмів просторово-часової фільтрації та маршрутизації інформаційних потоків. Проте, проведений аналіз систем автоматичного керування діаграмоутворенням адаптивних антенних систем показав, що такі системи фактично будуються конкретно під обрану технічну задачу, що відображається на їх собівартості, крім того, з точки зору доступності загальної інформації – вони є фактично закритими. На сьогодні для вищезазначених задач застосовують нейромереві адаптивні алгоритми. Так в статті [10] було розглянуто роботу адаптивного фільтра на базі нейронної мережі типу convolutional neural network (CNN), показано дієвість запропонованого авторами способу адаптивної фільтрації, однак підкреслюється що, процес обробки та параметризації даних сигналів є обчислювально складним, через велику кількість арифметичних операцій необхідних для поновлення коефіцієнтів адаптивного фільтра, і, залежить від вибору алгоритму.

Так в роботі [11] описується реалізації нейронної мережі адаптивного шумоподавлення з використанням алгоритму адаптивного фільтра LMS. При цьому коефіцієнти підлаштовуються нейронною мережею під вихідні параметри, замість численних адаптивних алгоритмів. Суть запропонованої нейронної мережі [11] полягає в можливості обробки параметрів в реальному часі та здатність оптимізації коефіцієнтів адаптивного фільтра в кожному новому отриманому кроці навчання, що особливо важливо в нестационарних умовах, але через паралельний і аналоговий характер обробки даних сигналу нейронною мережею, необхідного часу для обчислення цих коефіцієнтів недостатньо, а оцінка точності вихідних даних залежить від вибору алгоритмів (LMS, RLS), що в свою чергу накладає обмеження на час обробки параметрів. Щодо часткового вирішення проблем зменшення часу обробки та точності параметризації даних в роботі [12] було запропоновано нову структуру рекурентної нейронної мережі (RNN – LSTM) із довгою короткостроковою пам'яттю на основі алгоритму фільтрації Калмана. Запропонований спосіб показав підвищення точності та швидкість навчання нейронної мережі при статичному шумі, однак в нестационарних умовах точність визначення параметрів знижується.

Тому на основі вище зазначеного можна зробити проміжний висновок:

– процес адаптації є обчислювально складним для адаптивних фільтрів через велику кількість арифметичних операцій, необхідних для поновлення коефіцієнтів адаптивного фільтра системи управління антенною системою.

– обчислювальна складність процесу адаптації залежить від алгоритму адаптації (RLS, LMS), що використовується.

Стаття складається з трьох розділів в яких розкривається аналіз основних алгоритмів адаптації (RLS, LMS), та представлено концептуальне завдання застосування лінійного нейронного регулятора для фільтрації сигналів в адаптивних антенних решітках.

Метою роботи є проведення аналізу результатів удосконалення системи автоматичного керування адаптивних антенних решіток, та розробка пропозицій щодо застосування нейронного регулятора для алгоритмізації процесу управління діаграмою спрямованості антен.

Виклад основного матеріалу

1. Алгоритм LMS (Least-Mean-Square Algorithm). Один з найбільш поширених адаптивних алгоритмів, заснований на пошуку мінімуму цільової функції методом найшвидшого спуску [11]. При використанні даного способу оптимізації вектор коефіцієнтів фільтра $w(k)$ повинен рекурсивно оновлюватися наступним чином:

$$w(k+1) = w(k) - \frac{\mu}{2} \text{grad} J(w(k)) = w(k) + \mu p - \mu R w(k),$$

де коефіцієнт μ – розмір кроку.

Основною перевагою алгоритму LMS є мінімальна обчислювальна складність – для підстроювання коефіцієнтів фільтра на кожному кроці потрібно виконати $N+1$ пар операцій “множення-додавання”. *Недоліком алгоритму* є повільна збіжність і підвищена (у порівнянні з мінімально можливим значенням) дисперсія помилки в сталому режимі – коефіцієнти фільтра завжди флюктують навколо оптимальних значень, що і збільшує рівень вихідного шуму. Існує велика кількість модифікацій алгоритму LMS [1–3, 5], спрямованих на прискорення збіжності або на зменшення числа арифметичних операцій. Прискорення збіжності може бути досягнуто за рахунок поліпшення використовуваної оцінки градієнта, а також за рахунок перетворення вхідного сигналу з метою перетворення його відліків на некорельовані. Зменшення обчислювальної складності можна досягти за рахунок використання не сигналу помилки і вмісту лінії затримки фільтра, а лише їх знаків. Це дозволяє повністю позбутися від операцій множення при оновленні коефіцієнтів фільтра. Таким чином, слід зазначити, що *вимоги прискорення збіжності і скорочення обчислювальних витрат є суперечливими*.

Розглядаючи статистичну задачу оптимізації, ми вважали вхідний сигнал *випадковим процесом* і мінімізували *середній квадрат* помилки відтворення зразкового сигналу. Однак можливий і інший підхід, який не використовує статистичні методи.

2. Алгоритм RLS (Recursive-Least-Squares Algorithm). В процесі прийому сигналу можливо на кожному черговому кроці перераховувати коефіцієнти фільтра безпосередньо за формулою [5]

$$J(w) = \sum_{k=0}^{K-1} |e(k)|^2 \rightarrow \min.$$

Відповідний алгоритм називається рекурсивним методом найменших квадратів [2, 4]. При використанні алгоритму RLS здійснюється рекурсивне оновлення оцінки зворотної кореляційної матриці.

На рис. 1 показано модель побудована в MATLAB з метою дослідження особливостей вище згаданих алгоритмів.

Головною перевагою алгоритму RLS є швидка збіжність, що впливає на зменшення ймовірності помилки при передачі інформації. Однак досягається це за рахунок значно вищої (в порівнянні з алгоритмом LMS) обчислювальної складності.

Відповідно до [3] для повторного оновлення коефіцієнтів фільтра потрібно $(2,5N^2 + 4N)$ пар операцій „множення-додавання”.

У деяких джерелах, зокрема [2, 3], алгоритми RLS і Калмана ототожнюються.

На рис. 2 представлено осцилограми результатів реалізації алгоритмів адаптивної фільтрації LMS та RLS.

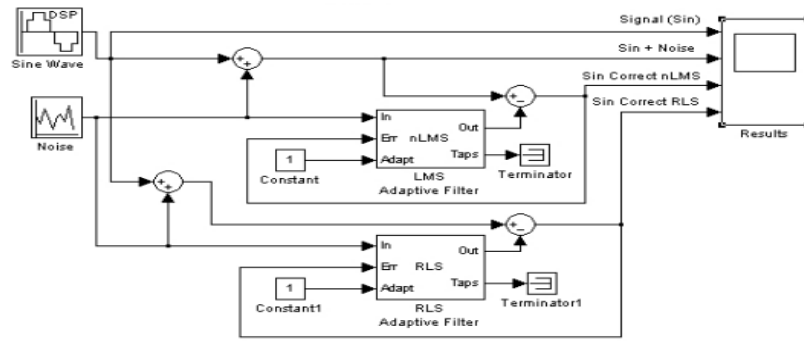


Рис. 1. Модель побудована в MATLAB з метою дослідження особливостей адаптивних LMS – та RLS – алгоритмів

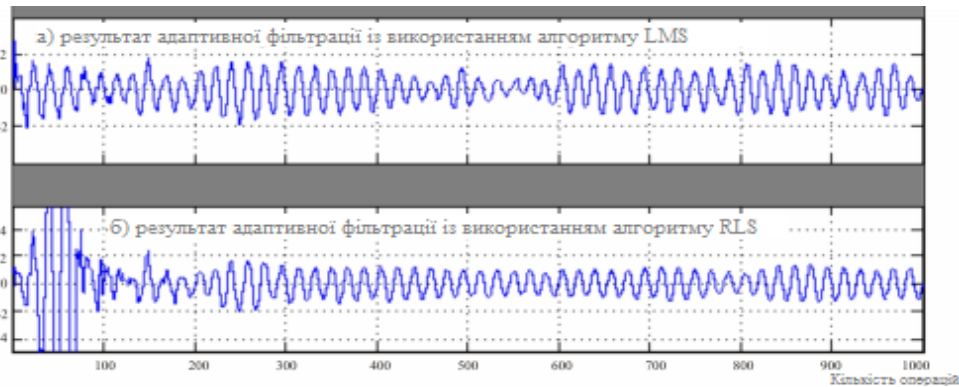


Рис. 2. Результати адаптивної фільтрації із використанням
а) алгоритму LMS; б) алгоритму RLS

Таким чином, основною відмінністю даних алгоритмів є робота алгоритму LMS із статистичними сигналами, а RLS с детермінованими сигналами.

Автори підкреслюють, актуальність використання обох алгоритмів по чергово. Їх застосування забезпечується нейрорегулятором (рис. 3).

Це пов'язано, перш за все, із природою розповсюдження радіохвиль. Корисні сигнали, що випромінюються передавальною антеною радіотехнічних пристроїв, є, як правило, вузькосмугові. Але прийнятий сигнал у системах радіолокації й у різних системах радіозв'язку (наземної, іоносферної, тропосферної, метеорної, космічної тощо) буде різним.

Внаслідок поширення електромагнітних коливань через середовище розповсюдження корисний сигнал у місці приймання можна представити у вигляді суми детермінованої й випадкової складових, що характеризують відповідно амплітудний коефіцієнт і фазовий зсув детермінованої складової сигналу; час запізнювання прийнятого сигналу.

3. Застосування лінійного нейронного регулятора для параметризації та фільтрації сигналів в адаптивних антенних решітках.

На рис. 3 представлено структурну схему вихідної адаптивної антенної решітки. На рисунку підкреслено, що формування діаграми спрямованості еквідистантної ААР із кількістю модулів (N), відбувається за рахунок керування лише двома ключовими параметрами на кожному із прийомо-передавальних модулів антени, тобто амплітудою $A_i(t)$ і фазою φ_i . Вираз, що описує діаграму спрямованості $G(\theta)$ N -елементної еквідистантної ААР має вигляд

$$G(\theta) = \sum_{i=1}^N A_i \left(1 + e^{j2\pi \frac{d \sin(\theta - \varphi_i)}{\lambda_0}} \right).$$

Сигнал $X(A_i, \varphi_i)$, являє собою матрицю параметрів вихідних значень модулів ААР.

У роботі пропонується здійснювати процес адаптивної фільтрації у три етапи.

По-перше повинна бути здійснена параметризація вихідних станів модулів антенної решітки, за допомогою нейронної мережі, зображеної на рис. 5.

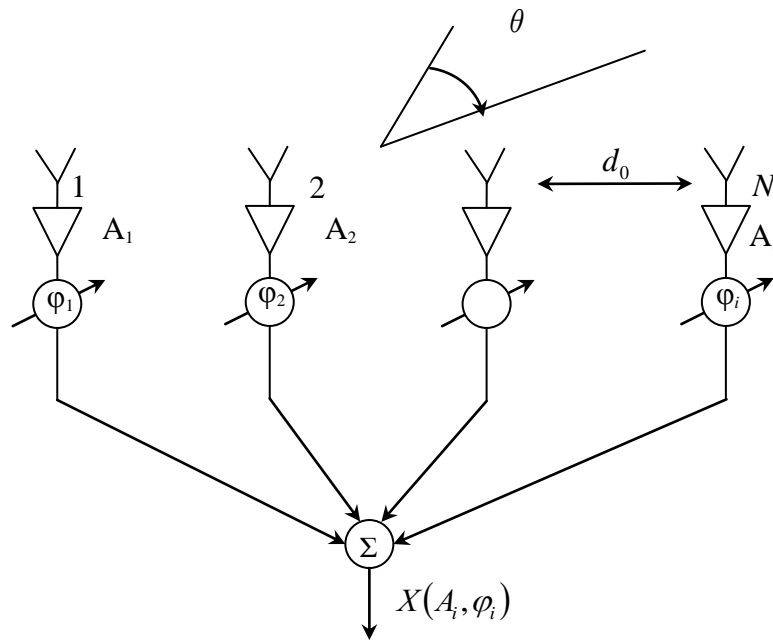


Рис. 3. Узагальнена функціональна схема ААР

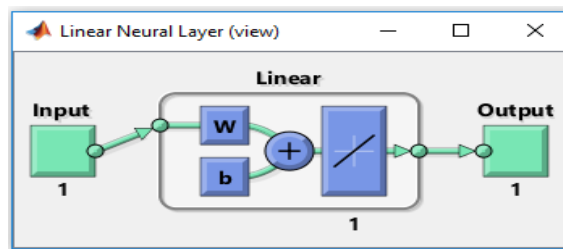


Рис. 4. Елемент лінійної нейронної мережі параметризації станів ААР

На другому етапі сигнал із виходу нейронної мережі «параметризації» станів надходить на вхід нейронного регулятора, що призначений для алгоритмізації процесу керування діаграмою спрямованості ААР в цілому (рис. 5). Нейронна мережа здійснює обробку вхідних параметрів $Y(\omega_i, b_i)$ у відповідності із застосованим адаптивним алгоритмом (RLS, LMS). У радіопристроях часто обмежуються розглядом випадків, коли флуктуації амплітуди сигналу підпорядковуються закону Релея. Результати експериментальних досліджень повільних завмирань сигналів у радіолініях, що використовують іоносферне або тропосферне розсіювання, показують, що фединги в таких системах часто описуються також законом Релея й мають квазістаціонарний характер. Для систем радіозв'язку, із адаптивними антенами необхідно задаватися кінцевими значеннями величин, що використовуються як вихідні дані $(X(A_i, \varphi_i))$ див. рис. 5), і використовуються спочатку для формування параметрів нейронної мережі „параметризації”. На третьому етапі у блоці нейрорегулятора із використанням алгоритму LMS усуваються стаціонарні помилки (шуми), а за рахунок алгоритму RLS і випадкові (розсіяні) складові. Таким чином, на цьому кроці відбувається процес прогнозування наступного значення стаціонарного випадкового процесу. Нехай $p(t)$ – випадковий стаціонарний процес встановлення параметрів амплітудно-фазових значень ААР $Y'(A_i, \varphi_i)$, що надходить на лінійний нейрорегулятор (рис. 6). Нейронний регулятор використовується для зміни ваги в синапсах (матриці станів) на кожному кроці навчання, для зведення до мінімуму помилки що представлена у вигляді шуму $e(t)$ (рис. 6).

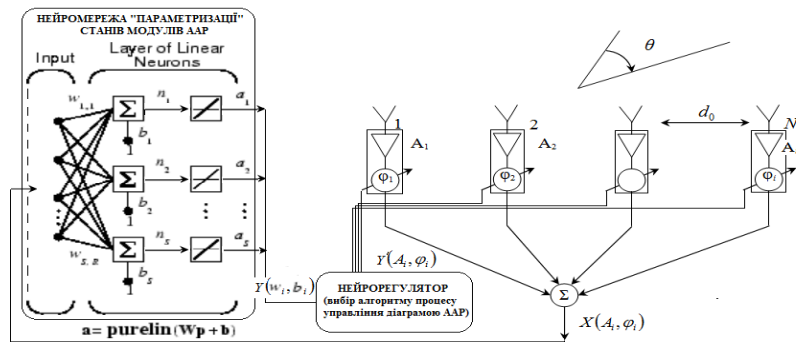


Рис. 5. Структурна схема алгоритму адаптивної фільтрації

сигналів в адаптивних антенних решітках

Якщо ця помилка дорівнює 0, вихід мережі $a(t)$ в точності дорівнює $p(t)$, тим самим нейромережа зменшує час навчання в реальному часі, також нейронний регулятор адаптується на кожному часовому кроці, щоб мінімізувати помилку, і за відносно короткий час може передбачити вхід $p(t)$, що в свою чергу мінімізує час вибору відповідного адаптивного алгоритму (RLS, LMS).

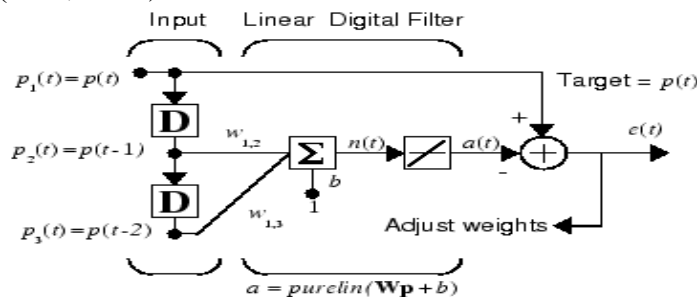


Рис. 6. Приклад нейрорегулятора

Особливість запропонованої системи відрізняється від аналогів [10 – 15] тим що, процес адаптації, параметризації відбувається за рахунок лінійної нейромережі, без допомоги рекурентних алгоритмів, яка реагує на зміни в своєму середовищі під час роботи та коригується на кожному часовому кроці навчання на основі нових вхідних і цільових векторів за допомогою алгоритмів автоматичного підлаштування гіпер параметрів, таким чином мінімізується помилка (шум) для вхідних і цільових векторів, що в свою чергу, зменшить кількість арифметичних операцій, необхідних для поновлення коефіцієнтів адаптивного фільтра, що відповідає меті дослідження.

Висновки. Таким чином, в роботі розглянуті процеси адаптивної фільтрації в адаптивних антенних решітках. Проведено аналіз алгоритмів адаптивної фільтрації, одним із напрямків їх удосконалення визначено алгоритм на базі вирішуючої системи на базі нейронної мережі. Розглянуті алгоритми адаптивної фільтрації, які можуть використовуватись в системах радіозв'язку з адаптивними антенними решітками, проведено порівняльний аналіз таких алгоритмів, визначено їх особливості, переваги та недоліки.

Основним *недоліком* алгоритму *LMS* є повільна збіжність і підвищена дисперсія помилки в сталому режимі. На практиці застосування таких алгоритмів призводить до збільшення рівня вихідного шуму, що є не прийнятним у випадку формування вузького променя адаптивної антенної решітки. В той же час *перевага* алгоритму *LMS* полягає у низькій обчислювальній складності і легкості використання для усунення стаціонарної складової помилки.

Головною перевагою використання алгоритму *RLS* є можливість забезпечення кращої стійкості системи адаптивної фільтрації, але із урахуванням обмежень на кількість елементів АР призводить до збільшення обчислювальної складності системи в умовах перехідних процесів перенастроювання ААР, ця задача легко вирішується враховуючи потужності сучасної елементної бази. Крім того, такий алгоритм доцільно використовувати для усунення випадкових складових помилок. Застосування нейрорегулятора для вибору адаптивних

алгоритмів дозволяє частково, або повністю виключити застосування класичних фільтрів, у зв'язку із тим, що операція виділення корисної інформації здійснюється із вхідного сигналу а не фільтрується із шуму.

Напрямок подальших досліджень – удосконалення нейрорегулятора у випадках зміни застосованої функції активації під час процесу навчання нейронної мережі управління діаграмоутворенням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беляков Р. О. Аналіз методів діаграмоутворення адаптивних антенних решіток радіозасобів на базі рухомих об'єктів [Текст] / Р. О. Беляков, О. Г. Цатурян // Збірник наукових праць ВІТІ. – Київ, 2017. – Вип. 4. – С. 6 – 13.
2. Джиган В.И. Прикладная библиотека адаптивных алгоритмов // Электроника: Наука, Технологии, Бизнес. – 2006. – № 1. – С. 60 – 65.
3. Методика підвищення швидкодії та динамічної точності систем автоматичного керування АФАР на рухомих об'єктах [Текст] / Р. О. Беляков, Г. Д. Радзівілов, Є. В. Лебідь, О. Г. Цатурян // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2015. – № 1. – С. 6 – 15.
4. Цатурян О.Г. Аналіз алгоритмів адаптивної фільтрації сигналів в системах радіозв'язку [Текст] / О.Г. Цатурян, Р.О. Беляков, Лебідь Є.В., В.В. Мартинюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 4. – С. 132 – 140.
5. Djigan V.I. Joint use of constant modulus and least squares criteria in linearly-constrained communication arrays // Radioengineering: Proceedings of Czech and Slovak Technical Universities and URSI Committers. – 2007. – V. 16. – № 4. – P. 88 – 95.
6. Do-Chang Ahn, Jae-Woo Lee, Seung-Jun Shin, Woo-Jin Song. A new robust variable weighting coefficients diffusion LMS algorithm, Signal Processing, v.131 n.C, p.300-306, 2017.
7. Chen Y., Le-Ngoc T., Champagne B., Xu C. Recursive least squares constant modulus algorithm for blind adaptive array // IEEE Trans. Signal Processing. – 2004. – № 5. – P. 1452 – 1456.
8. Godara L.C. Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations // Proceedings of the IEEE. – 1997. – № 8. – P. 1195 – 1245.
9. Dhanasekaran B. Efficient Active Noise Cancellation for Decision Tree Technique of ANN. / Dhanasekaran. // Ph.d Scholar, Department. of ECE, JJT University, Rajasthan, India. – 2016. – № 1. – С. 45 – 46.
10. Prasanna K. Adaptive Filter Algorithms Based Noise Cancellation Using Neural Network in Mobile Applications / K. Prasanna, K. Ramesha. // International Conference on Intelligent Computing and Applications. – 2017. – № 2. – С. 67 – 78.
11. Aakriti A. A Comparative Study of Noise Cancellation Using Least Mean Squares Adaptive Filter and Recurrent Neural Network Filter / A. Aakriti, A. Rohitkumar, B. Sainath. // Conference: 2018 2nd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE). – 2018. – № 2. – С. 67 – 80.
12. Shubhra D. Neural network implementation of Least-Mean-Square adaptive noise cancellation Conference Paper / D. Shubhra, N. Deepak. // Department of Electrical Engineering and E & C, Bundelkhand Institute of Engineering and Technology. – 2015. – № 2. – С. 12 – 26.
13. Sajjad A. System identification using LMS, NLMS and RLS / A. Sajjad, F. Muhammad. // Department of Engineering and IT National University of Modern Languages Islamabad, Pakistan. – 2015. – № 2.
14. Feng Chen, Tao Shi, Shukai Duan, Lidan Wang, Jiagui Wu. Diffusion least logarithmic absolute difference algorithm for distributed estimation, Signal Processing, v.142 n.C, p.423 – 430, January 2018.
15. Wenyuan Wang , Haiquan Zhao , Qianqian Liu, Diffusion Sign Subband Adaptive Filtering Algorithm with Individual Weighting Factors for Distributed Estimation, Circuits, Systems, and Signal Processing, v. 36 n. 6, p. 2605 – 2621, June 2017.