

УДК 621.395.721.5

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.065257

О. Г. ПЛЮЩ, канд. техн. наук;

В. І. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ВИКОРИСТАННЯ СХЕМ ШАРП В АЛГОРИТМАХ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ В АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТКАХ

*Розглянуто градієнтні алгоритми адаптації в антенних решітках і проаналізовано їх ефективність із використанням раніше синтезованого алгоритму. Запропоновано застосувати схеми шумового автоматичного регулювання підсилення (ШАРП) у контурах адаптивного керування раніше розробленого алгоритму. Показано, що цей підхід послаблює вплив інтенсивності змінних шумів без погіршення працездатності антенної решітки. Проведено комп'ютерне моделювання адаптивної антенної решітки на основі алгоритму з ШАРП за різних заводських ситуацій. Високу працездатність поліпшеного алгоритму було підтверджено в складних заводських умовах.*

**Ключові слова:** системи мобільного зв'язку; адаптивні антенні решітки; градієнтні алгоритми налаштування; імітаційне моделювання; відношення корисний сигнал/завада; шумове автоматичне регулювання підсилення.

### ВСТУП

**Постановка задачі.** Адаптивні антенні решітки (ААР) набувають дедалі широкого застосування для розв'язання різноманітних завдань у таких галузях науки і техніки, як телекомунікації, радіо та гідро-локація. Існує певна кількість достатньо простих, проте досить ефективних алгоритмів налаштування таких решіток. Але майже всі вони потребують наявності в тому чи іншому вигляді опорного сигналу, що обмежує їх сферу застосування. Для розв'язання цієї проблеми авторами було синтезовано та досліджено градієнтний алгоритм адаптації ААР, для якого немає необхідності в опорному сигналі [3]. Незважаючи на те, що цей алгоритм підтвердив свою ефективність у великому спектрі заводських ситуацій, невирішеною є проблема вибору кроку налаштування алгоритму. Цей крок, інакше відомий як коефіцієнт зворотного зв'язку, визначає швидкість налаштування алгоритму та його стійкість. Загальновідомо, що для забезпечення стабільності алгоритмів найшвидшого спуску, цей розмір кроку має бути меншим за зворотне значення максимальної величини власного значення кореляційної матриці вхідних заводських сигналів решітки. Оскільки ці власні значення широко змінюються в різних заводських ситуаціях, то такі варіації становлять проблему для вибору розміру кроку налаштування. Одним зі шляхів вирішення цієї процедури є розрахунок кореляційної матриці решітки. Але цей підхід призводить до значного зростання у використанні обчислювальної потужності ААР, що знецінює всі переваги градієнтних методів адаптації [1; 2]. Отже, важливим є завдання пошуку та оцінювання ефективності простих способів модифікації розробленого алгоритму налаштування ААР, за яких крок налаштування може бути зафіксований і не потребуватиме постійного коригування.

**Аналіз літературних джерел.** Питання щодо покращення характеристик роботи та розроблення нових алгоритмів для практичного застосування ААР широко висвітлюються в науково-технічній літературі [1; 2; 4; 5]. Зі зростанням потужностей процесорів оброблення сигналів в ААР уможливується застосування все більш складних алгоритмів, зокрема пов'язаних із обертанням кореляційної матриці [2]. Але і прості градієнтні алгоритми не втрачають своєї привабливості для розробників ААР [1].

Адаптивні антенні решітки починають широко впроваджуватися в стільникові мережі 4-го та 5-го покоління для забезпечення зв'язку між мобільними та базовими станціями, значно збільшуючи ємність цих систем та їх швидкість передавання.

Проте в джерелах інформації не достатньо приділено уваги тому, які саме алгоритми доцільно використовувати в ААР для систем мобільного зв'язку. Наприклад, хоча в [1] і зазначено, що ААР забезпечують істотне покращення показників зв'язку в безпроводових мережах, але ніяких адаптивних алгоритмів не наведено і не надано будь-яких практичних рекомендацій щодо їх вибору.

**Нерозв'язані питання.** Проаналізувавши літературні джерела, можна дійти висновку, що розробленню алгоритмів налаштування ААР у системах мобільного зв'язку не приділено достатньої уваги і в цьому напрямку потрібно проводити подальші дослідження. Нагальним є розроблення простих адаптивних алгоритмів налаштування ААР, котрі не потребують як наявності опорного сигналу, так і постійної зміни кроку налаштування залежно від динамічної заводської ситуації.

**Мета та завдання дослідження.** Метою роботи є отримання алгоритму налаштування ААР, який не потребує наявності опорного сигналу та постійного налаштування кроку адаптації під час зміни заводського середовища.

© О. Г. Плющ, В. І. Кравченко, 2019

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові завдання:

- аналіз проблем, які постають у розробленому алгоритмі налаштування ААР, що не потребує формування опорного сигналу;
- пошук певного варіанта забезпечення стабільності та швидкості налаштування ААР у запропонованому алгоритмі;
- моделювання вибраного варіанта забезпечення стійкості розробленого алгоритму ААР до динамічних змін заводової ситуації та аналіз його ефективності.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

#### Аналіз проблем, які постають у розробленому алгоритмі налаштування ААР, що не потребує формування опорного сигналу

Схему вузькосмугової антенної решітки, що налаштована на корисний сигнал і не потребує формування опорного сигналу для забезпечення процесу адаптації наведено на рис. 1. Налаштування здійснюється завдяки використанню фазообертачів у кожному каналі. При цьому напрям приходу корисного сигналу вважається відомим.

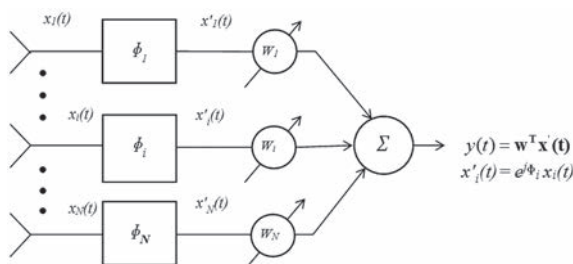


Рис. 1. Структурна схема вузькосмугової антенної решітки, налаштованої на корисний сигнал

Вектор сигналів з елементів антенної решітки після фазообертачів матиме такий вигляд:

$$\mathbf{x}'(t) = \mathbf{\Phi} \mathbf{x}(t), \quad (1)$$

де  $\mathbf{\Phi}$  — діагональна матриця типу

$$\mathbf{\Phi} = \begin{pmatrix} e^{j\Phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\Phi_N} \end{pmatrix}.$$

У [3] авторами було виконано синтез градієнтного алгоритму за критерієм мінімізації дисперсії

(потужності) сигналу на виході решітки після проведення процедури (1) за певних обмежень, накладених на ваговий вектор. Здобутий алгоритм набирає вигляду

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

$$w_i(k+1) = \frac{w_i(k+1)}{\sum_{n=1}^N w_n(k+1)}, \quad (2)$$

де  $N$  — кількість елементів в антенній решітці, а вектор  $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$ .

У (2) важливим є крок налаштування  $\Delta_s$ , інакше відомий як коефіцієнт зворотного зв'язку, що визначає швидкість налаштування алгоритму та його стійкість до збурження.

Щоб оцінити вплив змін у рівнях сигналів на якість функціонування (2), було здійснено його імітаційне моделювання із застосуванням середовища Matlab.

Імітаційне моделювання було проведено для лінійної вузькосмугової антенної решітки з такими параметрами: кількість елементів в антенній решітці — 9; відстань між елементами — половина тривалості хвилі; потужність внутрішнього шуму в кожному каналі решітки — одиниця.

Оцінювання перехідного процесу налаштування відбувалося з використанням відношення корисний сигнал/завада, відомого як SNR, на виході решітки. Для моделювання шумових процесів застосовувалися некорельовані відліки, розподілені за нормальним законом. Потужність заводових сигналів вимірювалася в умовних одиницях відносно потужності внутрішнього шуму.

У заводої ситуації, що застосовувалася під час комп'ютерної симуляції, було імітовано три сторонніх джерела шумових сигналів із кутами падіння відносно нормалі до розкриття решітки  $-28,648$ ,  $-57,296$  та  $57,296$  градусів, із відповідними рівнями потужності відносно внутрішніх шумів у каналах 200, 300 та 250 одиниць із подальшим збільшенням потужностей у 3 та 6 разів. Кут падіння корисного сигналу вважався таким, що дорівнює нулю градусів за потужності 100 одиниць, а крок налаштування решітки залишався постійним. Для отримання кривої виконувалося налаштування за 1 000 000 відліками вхідних сигналів решітки, при цьому усереднення відношення корисний сигнал/завада відбувалося за 10 незалежними реалізаціями.

Потенційно можливе відношення корисний сигнал/завада, обчислене за ідеальною кореляційною матрицею за відомими формулами [2] для зазначених умов моделювання становить майже 29,46 дБ.

Результати моделювання ілюструють криві, наведені на рис. 2, 3 та 4. Їх аналіз дозволяє дійти таких висновків.

У разі оптимального вибору кроку налаштування, як це зображено на рис. 2, відношення потужностей корисного сигналу до рівня завад за результатами адаптації наближається до потенційно досяжного. Різниця становить приблизно 2-3 дБ.

Зі збільшенням потужностей усіх джерел утричі швидкість адаптації зростає, але при цьому зменшується і значення SNR у стаціонарному режимі (див. рис. 3).

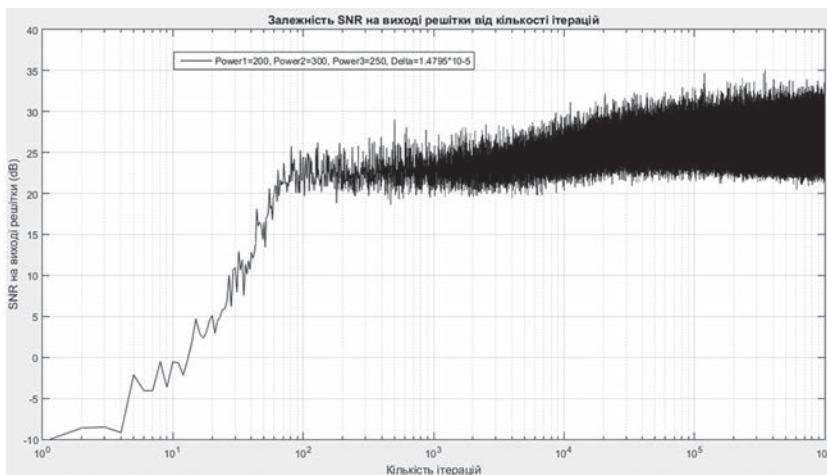


Рис. 2. Залежність SNR на виході антенної решітки від кількості ітерацій за потужностей завадових джерел 200, 300 та 250 одиниць

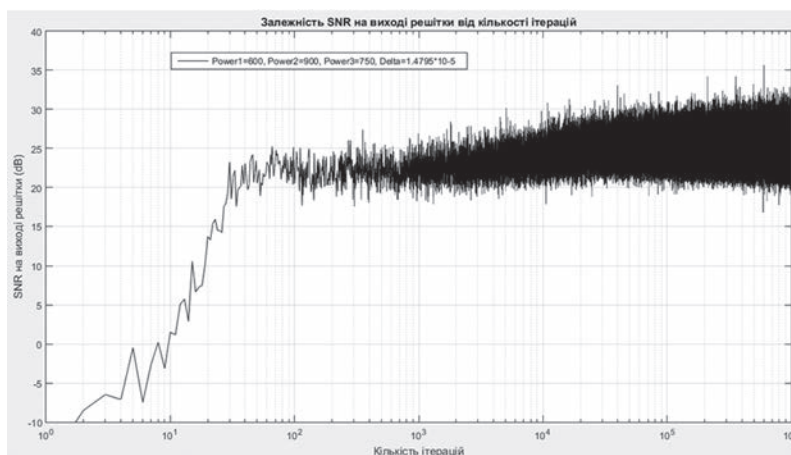


Рис. 3. Залежність SNR на виході антенної решітки від кількості ітерацій за потужностей завадових джерел 600, 900 та 750 одиниць

Із підвищенням потужностей завад у 6 разів і збереженням того самого рівня кроку налаштування алгоритм втрачає свою ефективність і стає нестабільним (призводить до збудження), що ілюструє рис. 4.

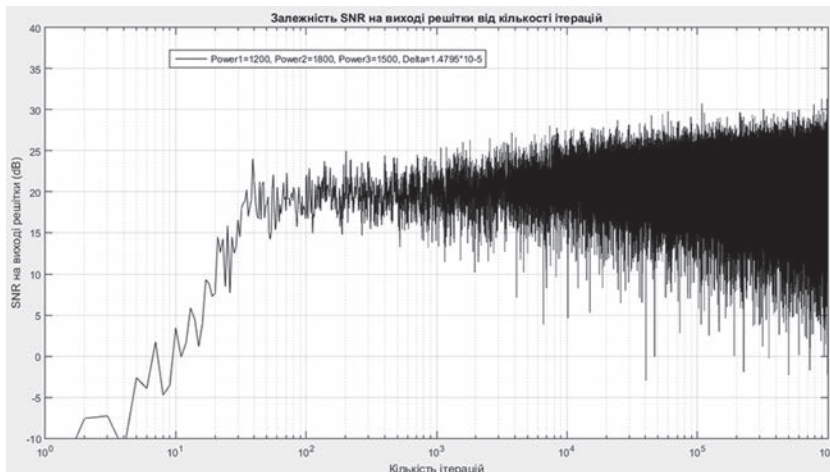


Рис. 4. Залежність SNR на виході антенної решітки від кількості ітерацій за потужностей завадових джерел 1200, 1800 та 1500 одиниць

Проблеми, зумовлені нестабільністю системи в процесі налаштування, можна усунути адаптацією кроку налаштування  $\Delta_s$  у бік зменшення. Але, як зазначалося, ця адаптація коефіцієнта зворотного зв'язку є складною та такою, що надмірно споживає обчислювальні ресурси ААР. З огляду на це потрібно дослідити інші методи стабілізації алгоритму, не пов'язані зі зміною кроку налаштування.

### *Аналіз наявних методів забезпечення стабільності та швидкості адаптації алгоритмів налаштування ААР*

Як свідчить аналіз джерел, для стабілізації процесу адаптації можна використовувати або обмежувачі в ланцюгах налаштування адаптивної решітки [1; 2], або схеми шумового автоматичного регулювання підсилення (ШАРП).

У роботі пропонується для стабілізації функціонування алгоритму налаштування ААР використовувати схему ШАРП, оскільки схеми обмеження вносять нелінійні спотворення в сигнали антенної решітки.

Схеми ШАРП пропонується застосовувати в алгоритмі (2) до елементів вектора  $x'(k)$ . При цьому достатньо оцінювати потужність в одному каналі ААР, виходячи з того, що в інших каналах вона та сама, що зумовлено однотипністю каналів решітки.

### *Імітаційне моделювання ААР зі схемою ШАРП*

Імітаційне моделювання було проведено для тих самих умов, вказаних раніше. Єдина різниця полягає в тому, що рівні потужностей збільшувалися в 3, 6 і 10 разів.

Результати моделювання процесу адаптації антенної решітки за допомогою розробленого алгоритму (2) із використанням схеми ШАРП наведено на рис. 5, 6, 7 та 8.

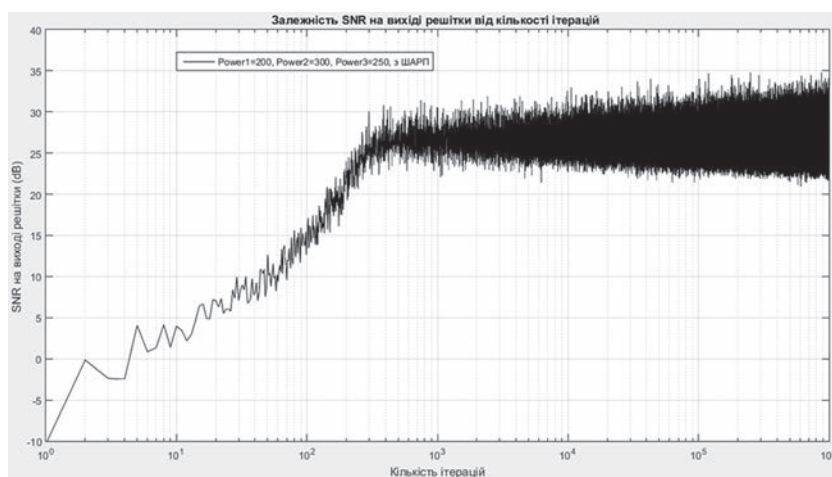


Рис. 5. Залежність SNR на виході антенної решітки з ШАРП від кількості ітерацій за потужностей заводових джерел 200, 300 та 250 одиниць

У всіх цих заводових ситуаціях потенційно можливе відношення корисний сигнал/завада або SNR досягає 29,46 дБ.

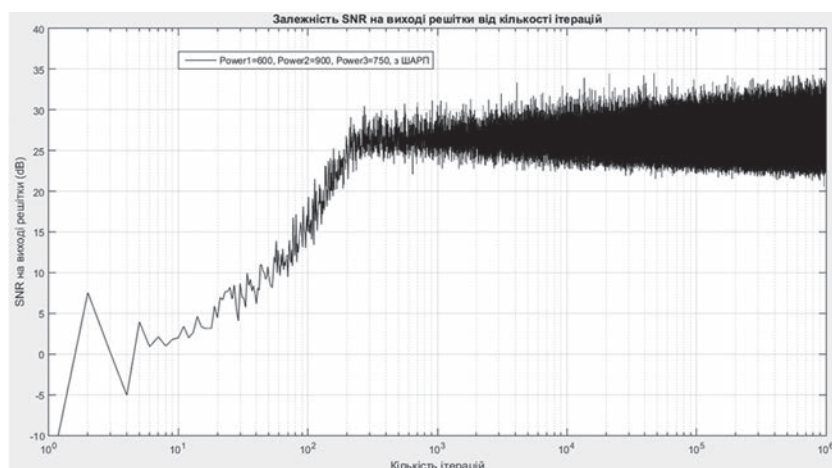


Рис. 6. Залежність SNR на виході антенної решітки з ШАРП від кількості ітерацій за потужностей заводових джерел 600, 900 та 750 одиниць



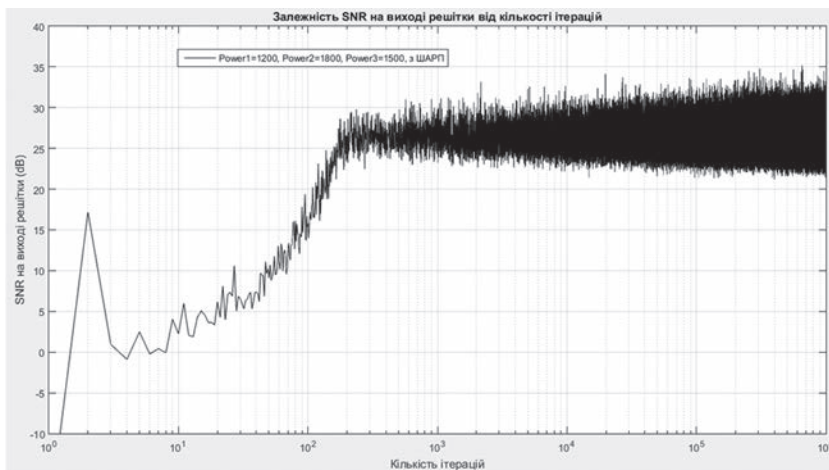


Рис. 7. Залежність SNR на виході антенної решітки з ШАРП від кількості ітерацій за потужностей заводських джерел 1200, 1800 та 1500 одиниць

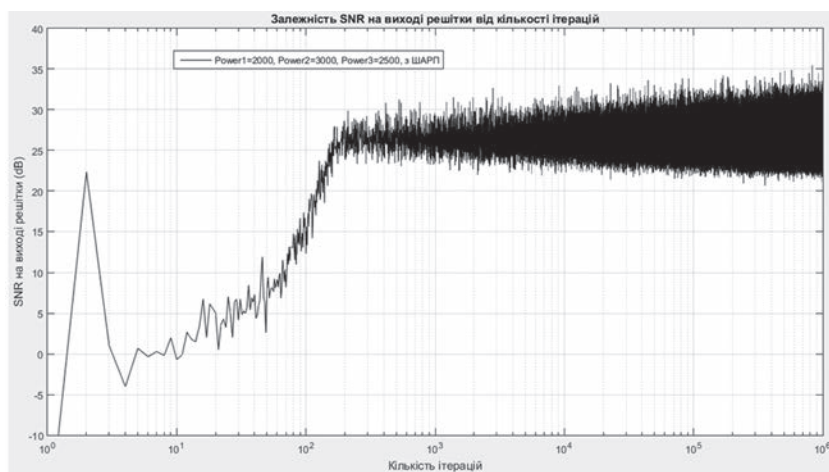


Рис. 8. Залежність SNR на виході антенної решітки з ШАРП від кількості ітерацій за потужностей заводських джерел 2000, 3000 та 2500 одиниць

Аналіз здобутих результатів моделювання дає можливість дійти таких висновків:

1. Алгоритм (2) із застосуванням схеми ШАРП продемонстрував свою працездатність та можливість протистояти динамічним змінам заводської обстановки. Навіть зі збільшенням потужностей джерел завод у 10 разів відхилення SNR в кінці процесу адаптації від потенційного становить не більш як 2 дБ.

2. Швидкість процесу налаштування змінюється не істотно навіть у разі значного підняття рівнів потужностей джерел завод, що вказує на її стабілізацію схемою ШАРП.

3. Загалом алгоритм (2) із застосуванням схеми ШАРП демонструє гарний баланс швидкість адаптації–досягнення відношення корисний сигнал/завада і може з успіхом використовуватися в антенних решітках у радіолокації та мобільному зв'язку.

### ВИСНОВКИ

Адаптивні антенні решітки знаходять все більшого застосування в системах мобільного зв'язку, особливо 4-го та 5-го поколінь. Авторами розроблено градієнтний алгоритм для адаптивної антенної решітки, який не потребує формування опорного сигналу. Налаштування антенної решітки на корисний сигнал відбувається за відомим кутом надходження цього сигналу, а придушення небажаних заводських сигналів — за допомогою алгоритму мінімізації дисперсії шуму.

Для покращення характеристик алгоритму за динамічних змін заводської обстановки без постійного оновлення значення кроку адаптації запропоновано використовувати схему ШАРП у ланцюгах налаштування ААР.

Моделювання розробленого алгоритму підтвердило його працездатність та ефективність.

Розроблений алгоритм може бути впроваджено в системах мобільного зв'язку 4-го та 5-го поколінь.

## Список використаної літератури

1. Robert J. Mailloux. *Phased Array Antenna Handbook / 3rd ed.* Boston: Artech House, 2018.
2. John Volakis. *Antenna Engineering Handbook / 5th ed.* New York: McGraw-Hill Education, 2018.
3. Pliushch O. G. *Gradient Signal Processing Algorithm for Adaptive Antenna Arrays Obviating Reference Signal Presence: IEEE International Scientific-Practical Conference PIC S&T (Kyiv, Ukraine, October 8–11 2019)*. Kyiv, 2019. 190 p.
4. *Адаптивные антенные решетки: учеб. пособие в 2-х ч. Ч. 1* / В. А. Григорьев, С. С. Щесняк, В. Л. Гулюшин [и др.] / под общ. ред. В. А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 179 с.
5. *Адаптивные антенные решетки: учеб. пособие в 2-х ч. Ч. 2* / В. А. Григорьев, С. С. Щесняк, В. Л. Гулюшин [и др.] / под общ. ред. В. А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 118 с.

О. Г. Плющ, В. И. Кравченко

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СХЕМ ШАРУ В АЛГОРИТМАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ**

Рассмотрены градиентные алгоритмы адаптации в антенных решетках и проанализирована их эффективность с использованием ранее синтезированного алгоритма. Предложено применить схемы шумовой автоматической регулировки усиления (ШАРУ) в контурах адаптивного управления ранее разработанного алгоритма. Показано, что этот подход ослабляет влияние интенсивности изменяющихся шумов без ухудшения работоспособности антенной решетки. Проведено компьютерное моделирование адаптивной антенной решетки на основе алгоритма с ШАРУ в различных помеховых ситуациях. Высокая работоспособность улучшенного алгоритма была подтверждена в сложных помеховых условиях.

**Ключевые слова:** системы мобильной связи; адаптивные антенные решетки; градиентные алгоритмы настройки; имитационное моделирование; отношение полезный сигнал/помеха; шумовая автоматическая регулировка усиления.

O. G. Plusch, V. I. Kravchenko

**UTILIZATION OF AGC CIRCUITS IN SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS IN ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS**

With the development of telecommunications systems and technologies, adaptive antenna arrays are increasingly used, especially in 4G and 5G mobile systems. The authors have developed a gradient algorithm for the adaptive antenna array, which does not require the formation of a reference signal. Gradient methods of adaptation in antenna arrays are considered and their efficiency is analyzed with respect to the novel algorithm developed previously. It is proven that for a changing signal environment, when powers of noise signals change substantially, wide variations in array performance with the proposed algorithm may take place, ranging from loss of ability to cancel noise to very slow convergence. It is offered to introduce automatic gain control (AGC) circuits into the adaptive control loops of the designed algorithm to improve the performance of the algorithm in the dynamic changes of the interference environment without constantly updating the value of the adaptation step. This technique is shown to mitigate the effects of varying noise intensity without compromising array performance. Computer simulation of adaptive antenna arrays based on the algorithm with the AGC circuits in different noise environments is carried out. A useful signal / interference ratio, known as SNR, at the output of the lattice was used to evaluate the tuning process. For the simulation of noise processes, uncorrelated readings distributed according to normal law were used. The interference signal strength was measured in terms of the relative noise power. The potential possible signal-to-noise ratio, calculated from the ideal correlation matrix by known formulas for these simulation conditions, is approximately 29.46 dB. Simulation of the developed algorithm confirmed its operability and effectiveness. High performance of the improved gradient algorithm is confirmed in challenging interference conditions.

**Keywords:** mobile telecommunication systems; adaptive antenna arrays; gradient adaptation algorithms; computer simulation; signal-to-interference ratio; automatic gain control circuits.

