

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТКАХ ПРИ РІЗНИХ РІВНЯХ ЗАВАД

**Pliushch O.G. Signal processing algorithm efficiency study in adaptive antenna arrays under different levels of interferences.**

The author has developed simple but pretty effective signal processing gradient algorithm for adaptive antenna arrays deployed in mobile networks. The feature of the algorithm is that it does not require presence of the reference signal, which greatly simplifies its practical implementation. Still, the problems of the algorithm operation in situations of complete interfering signals absence or their very low levels were not elaborated. To resolve this problem, tests were carried out of the algorithm in respective noise situations, which indicated that though certain deviations in the directivity patterns from the optimal ones were observed, they insignificantly impacted feasible signal-to-noise ratio. In this case, the lower interfering signal level was, the greater the respective deviations were. It is proposed to perfect the algorithm by introducing a threshold device, which activates adaptation mode only when interference reaches a certain level.

**Keywords:** mobile networks, adaptive antenna arrays, gradient adaptation algorithms, computer simulation, signal-to-noise ratio, threshold device.

**Плющ О.Г. Дослідження ефективності алгоритму обробки сигналів в адаптивних антенних решітках при різних рівнях завад.**

Раніше розроблений градієнтний алгоритм обробки сигналів в адаптивних антенних решітках було досліджено в нетипових ситуаціях, таких як відсутність завад або їх низький рівень. Результати комп'ютерного моделювання алгоритму засвідчили, що хоча і спостерігаються певні відхилення у діаграмі направленості від оптимальної, вони незначним чином впливають на досяжне відношення корисний сигнал/завада. Запропоновано шляхи удосконалення алгоритму за рахунок застосування адаптивного порогового пристрою.

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

**Плющ А.Г. Исследование эффективности алгоритма обработки сигналов в адаптивных антенных решетках при разных уровнях помех.**

Ранее разработанный градиентный алгоритм обработки сигналов в адаптивных антенных решетках был исследован в нетипичных ситуациях, таких как отсутствие помех или их низкий уровень. Результаты компьютерного моделирования алгоритма показали, что, хотя и наблюдаются определенные отклонения в диаграмме направленности от оптимальной, они незначительным образом влияют на достижимое отношение полезный сигнал/помеха. Предложено пути совершенствования алгоритма за счет использования адаптивного порогового устройства.

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

### Вступ

**Постановка задачі.** Адаптивні антенні решітки (ААР) все більше використовуються для підвищення ефективності передачі інформації у мобільних телекомунікаціях. Вибір практичних алгоритмів адаптації для таких решіток являє собою складну задачу. Однією з труднощів при цьому є необхідність формування опорного сигналу, що має високу ступень кореляції з очікуваним корисним сигналом та дуже низьку (бажано нульову) ступень кореляції з завадовими сигналами. Цей факт може обмежувати використання таких решіток. В [7] автором було запропоновано покращений градієнтний алгоритм, що не потребує присутності опорного сигналу в явній формі і при цьому достатньо тільки мати інформацію про кут приходу корисного сигналу. Алгоритм довів свою високу ефективність в складних

завадових ситуаціях. Але при подальшому аналізі виникла невпевненість щодо ефективності алгоритму при відсутності завад взагалі або при їх низькому рівні. Виходячи з наведеного, задача дослідження поведінки алгоритму в цих завадових умовах постає надзвичайно важливою та актуальною.

**Аналіз літературних джерел.** В науково-технічній літературі достатньо широко проробляються питання синтезу та практичної реалізації алгоритмів налаштування ААР [5,6]. Існує велика кількість таких процедур та підходів до покращення їх характеристик. Хоча обчислювальні можливості сучасних телекомунікаційних пристроїв суттєво зросли, що створює можливості для реалізації алгоритмів адаптації ААР з великою потрібною кількістю операцій за секунду, відповідно зростає і загальна кількість досить складних процедур, які потрібно виконувати в телекомунікаційних пристроях [1,2,3]. Тому, прості градієнтні алгоритми налаштування ААР залишаються в полі зору розробників [5].

З впровадженням систем мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління, і відповідним зменшенням тривалості хвиль, антенні решітки все більше стають технологією вибору для забезпечення зв'язку між мобільними пристроями та базовими станціями [1].

Літературні джерела не надають вичерпного аналізу того, які алгоритми найкраще використовувати в ААР для систем мобільного зв'язку і це питання залишається відкритим. Так, хоча в [1] і наголошується важлива роль ААР в покращенні показників зв'язку в мобільних мережах, жодних практичних рекомендацій щодо практичного застосування певних адаптивних алгоритмів не надано. До того ж, хоча в [5] і окреслюються можливі труднощі з формуванням опорного сигналу для алгоритмів адаптації, практичних шляхів вирішення цієї проблеми не наведено. Тому, запропонований в [7] алгоритм являє собою цікаве практичне рішення для використання в ААР.

**Невирішені питання.** Згаданий вище алгоритм довів свою ефективність в складних завадових ситуаціях, але був недостатньо досліджений в певних нестандартних умовах. Такими умовами є відсутність завад взагалі або їх невисокий рівень відносно внутрішніх шумів елементів решітки. Тому, ці питання потребують подальшого опрацювання і нагальною є перевірка функціонування розробленого алгоритму у вказаних ситуаціях функціонування ААР.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження ефективності раніше розробленого алгоритму налаштування ААР в умовах коли завадові сигнали або відсутні, або мають невелику потужність.

Для досягнення цієї мети розв'язуються такі наукові задачі:

- розробка імітаційної моделі ААР на основі синтезованого алгоритму налаштування;
- моделювання ААР у відповідних завадових умовах та інтерпретація отриманих результатів.

### 1. Аналіз розробленого алгоритму налаштування ААР

Детальний опис розробленого алгоритму та кроки його синтезу наведені в [7]. Рис. 1 ілюструє вузько-смугову антенну решітку в якій він може застосовуватися. Ця ААР налаштована на корисний сигнал за рахунок використання фазообертачів в кожному елементі і не потребує присутності опорного сигналу. Єдиною умовою є знання куту приходу корисного сигналу для налаштування фазообертачів.

Після проходження через фазообертачі в кожному каналі вектор сигналів елементів ААР має наступний вигляд:

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

де:  $\Phi$  – матриця діагонального типу

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

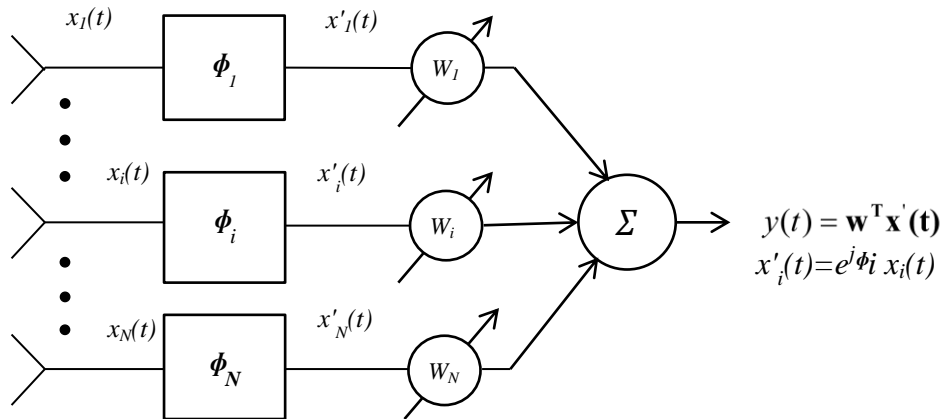


Рис. 1. Структурна схема вузько-смужової антенної решітки що налаштована на корисний сигнал

Синтезований в [7] по критерію мінімізації дисперсії (потужності) сигналу на виході решітки градієнтний алгоритм, що не потребує формування опорного сигналу, має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(k+1) &= \mathbf{w}(k) - \Delta_s (\mathbf{x}'(k) \mathbf{x}^T(k) \mathbf{w}(k) - y(k) y(k)^* \mathbf{1}) \\ w_i(k+1) &= \frac{w_i(k+1)}{\sum_{n=1}^N w_n(k+1)} \end{aligned} \quad (2)$$

де:  $N$  – кількість елементів в антенній решітці, вектор  $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$ ,  $T$  вказує на комплексне спряження та транспортування,  $*$  позначає скалярне спряження,  $k \in$  номер ітерації в рекурентному процесі,  $i$  та  $n$  позначають сигнал або ваговий коефіцієнт у певному елементі антени і  $\Delta_s$  представляє собою крок налаштування алгоритму.

Алгоритм (2) довів свою високу ефективність у присутності завад з великою потужністю [7]. Але його детальний аналіз дозволяє припустити, що у певних ситуаціях він може поводитися непередбачувано. Парадоксально, такими ситуаціями є такі, коли завади взагалі відсутні, або вони мають малий рівень відносно внутрішніх шумів. Розглянемо їх більш прискіпливо. Дійсно, у відсутності завадових сигналів на кожній ітерації в елементах антенної решітки будуть присутні тільки сигнали внутрішніх шумів, які не є корельованими. До того ж, вектори вхідних сигналів від ітерації до ітерації теж не є пов'язаними між собою. Ці два фактори можуть призводити до ситуації коли (2) не зможе забезпечити потрібне відношення корисний сигнал/завада, тому що при налаштуванні в системі існує повна невизначеність. В присутності завад сигнали в різних елементах решітки є корельованими між собою і алгоритм може використовувати цю інформацію для налаштування ААР.

## 2. Імітаційне моделювання

При імітаційному моделюванні використовувалася 9-ти елементна лінійна вузько-смугова антенна решітка з відстанню між елементами у половину тривалості хвилі. Потужність внутрішнього шуму в кожному елементі решітки приймалася рівною одиниці.

Для моделювання шумових процесів застосовувалися некорельовані відліки розподілені по нормальному закону. Потужність завадових сигналів, там де вони були присутні, вимірювалася в умовних одиницях відносно потужності внутрішнього шуму. Оцінка перехідного процесу та досяжного відношення корисний сигнал/завада здійснювалося по кривій, що відображає залежність відношення корисний сигнал/завада на виході решітки від кількості ітерацій при налаштуванні.

Результати моделювання процесу адаптації антенної решітки згідно (2) ілюструються графіками що наведені на Рис.2, Рис.3, Рис.4, Рис.5, Рис.6, Рис.7, Рис.8, Рис.9, Рис.10, Рис.11 і Рис.12. Імітувалося одне джерело завади з кутом падіння відносно нормалі до розкриву решітки 57.269 градусів. Його відносна потужність приймала значення 0, 1, 5, 10 та 100 одиниць. Кут падіння корисного сигналу вважався рівним 0 градусів. Налаштування проводилося по 1 000 000 відліків вхідних сигналів решітки, при цьому усереднення відношення корисний сигнал/завада відбувалося по 50 незалежним реалізаціям.

Потенційно можливе відношення корисний сигнал/завада, обчислене по ідеальній кореляційній матриці за відомими формулами [2] наведено на відповідних рисунках.

Рис.2, Рис.3, Рис.4, Рис.5 та Рис.6 демонструють залежність відношення корисний сигнал/завада на виході антенної решітки від кількості ітерацій для вказаних вище значень відносних потужностей завади. Аналіз даних наведених на цих рисунках дозволяє стверджувати, що при всіх рівнях завади досягне відношення корисний сигнал/завада не гірше ніж 3 дБ від оптимального (потенційного) значення, що є прийнятним і вказує на ефективність алгоритму (2).

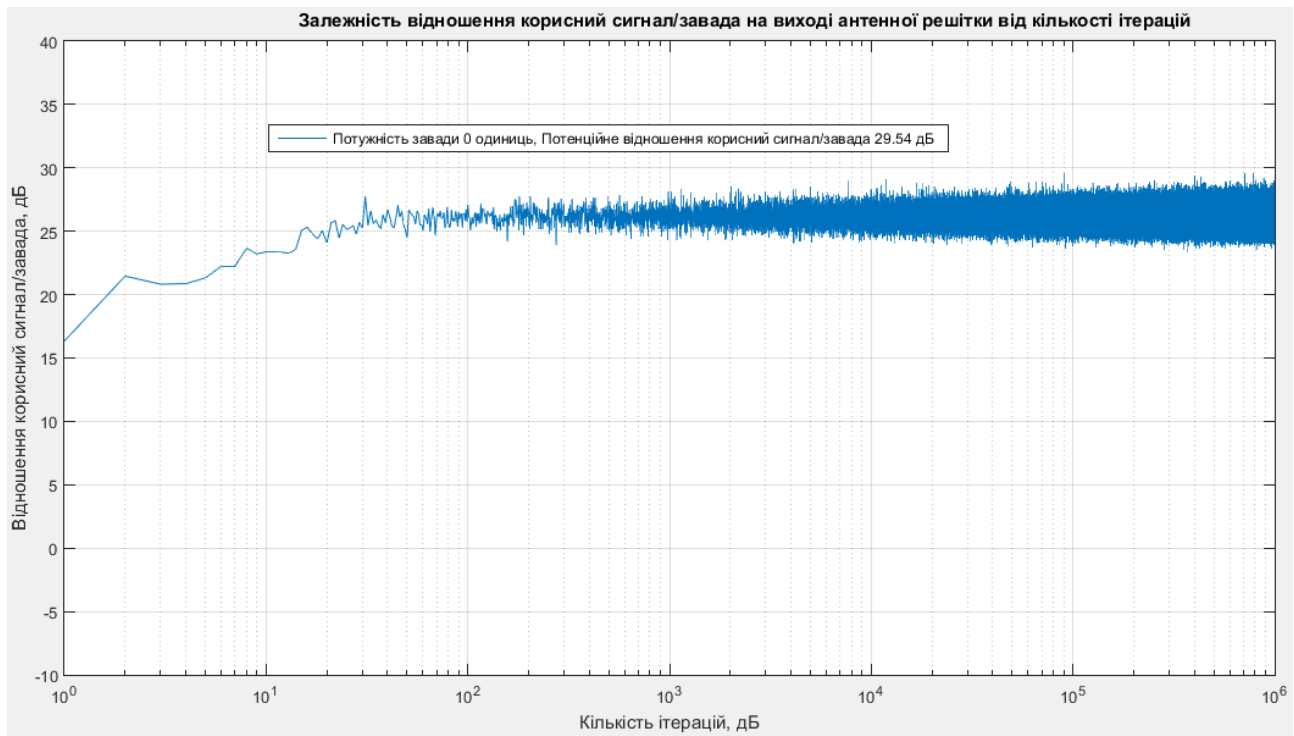


Рис. 2. Залежність відношення корисний сигнал/завада на виході антенної решітки від кількості ітерацій при потужності завади 0 одиниць

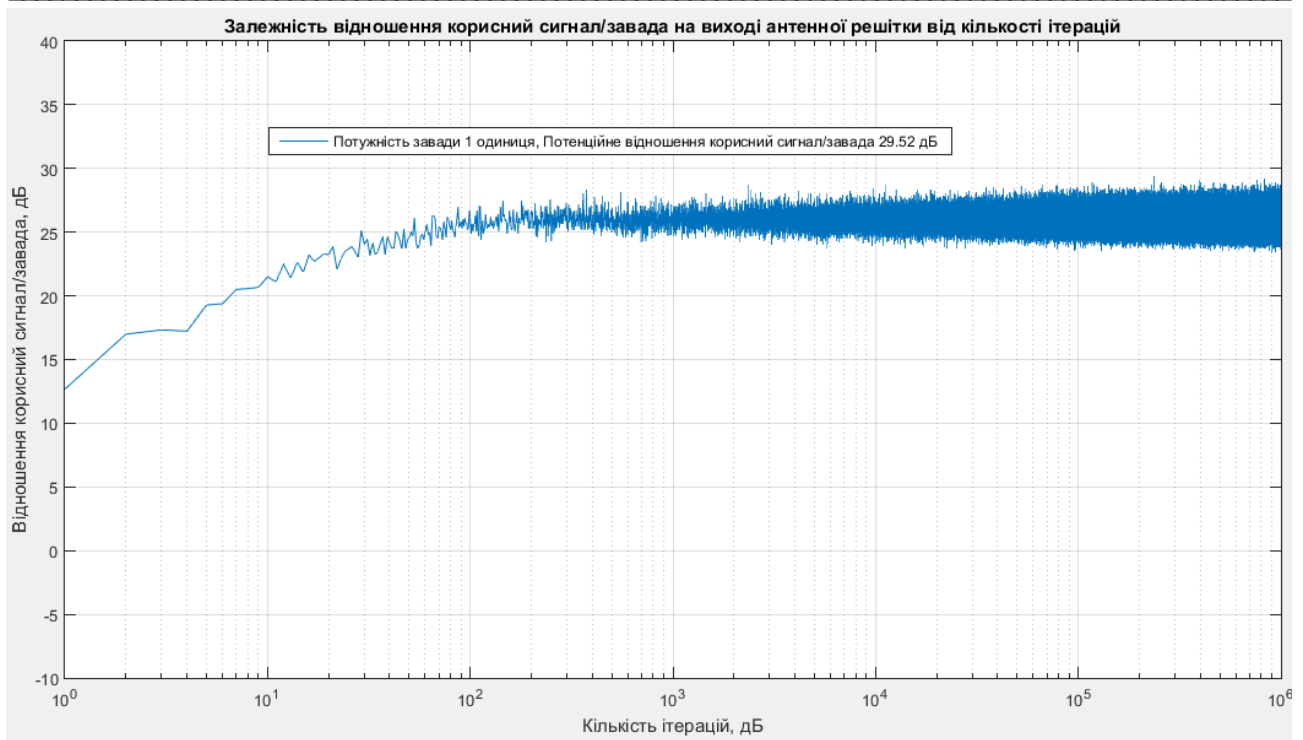


Рис.3. Залежність відношення корисний сигнал/завада на виході антенної решітки від кількості ітерацій при потужності завади 1 одиниця

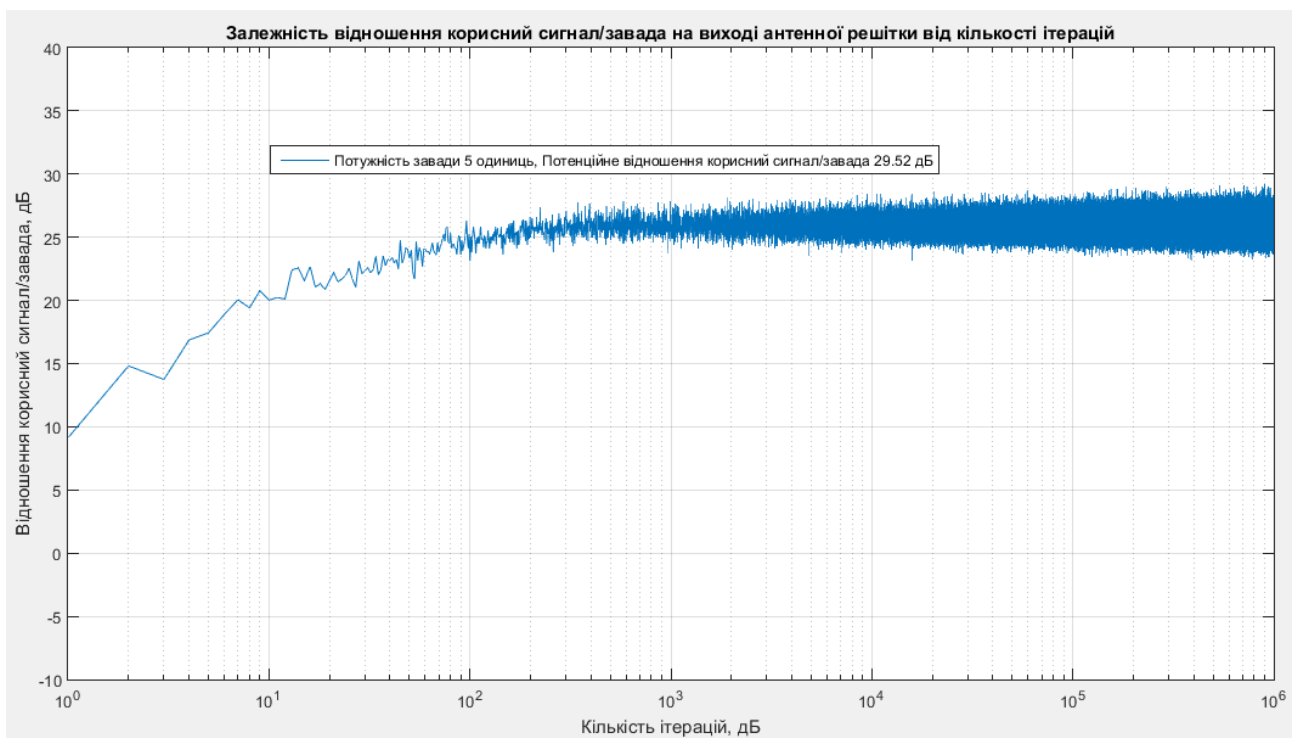


Рис.4. Залежність відношення корисний сигнал/завада на виході антенної решітки від кількості ітерацій при потужності завади 5 одиниць

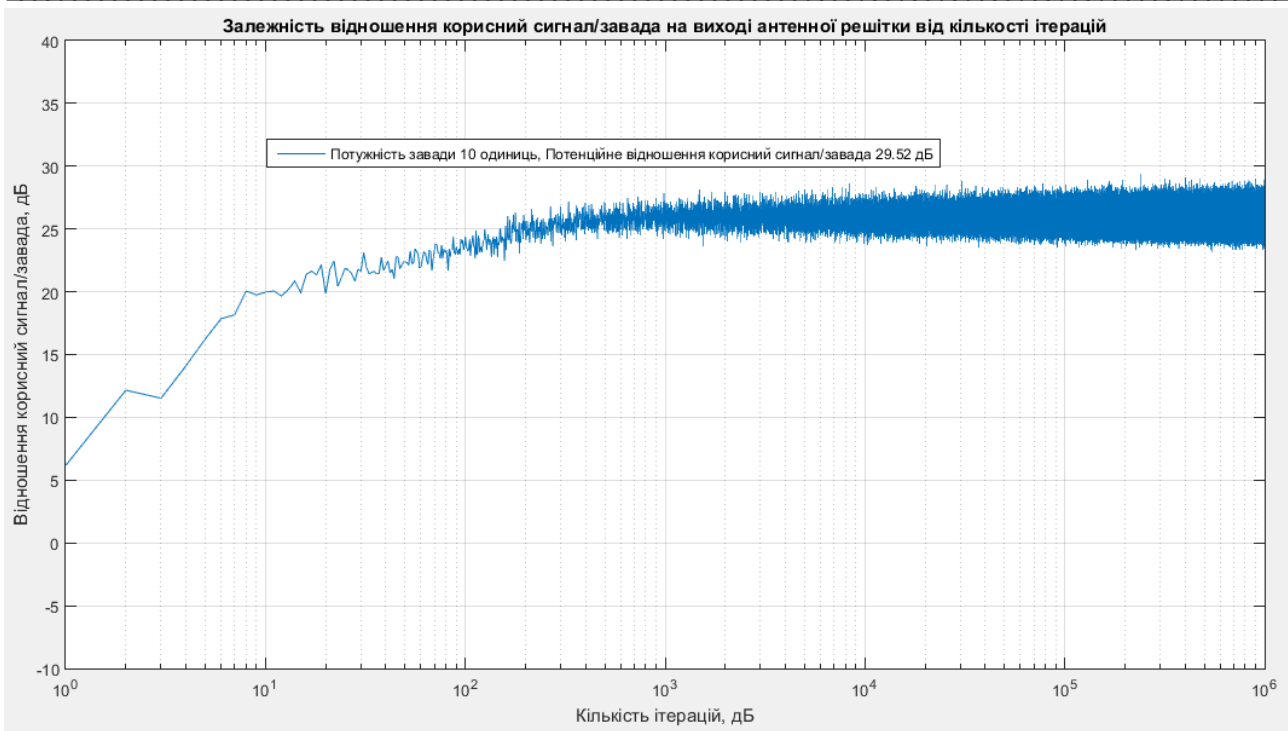


Рис.5. Залежність відношення корисний сигнал/завада на виході антенної решітки від кількості ітерацій при потужності завади 10 одиниць

Графіки зображені на Рис.7, Рис.8, Рис.9, Рис.10, Рис.11 і Рис.12 відображають ідеальні діаграми направленості ААР для деяких з вище вказаних ситуацій, та ті що отримані за результатами налаштування згідно (2).

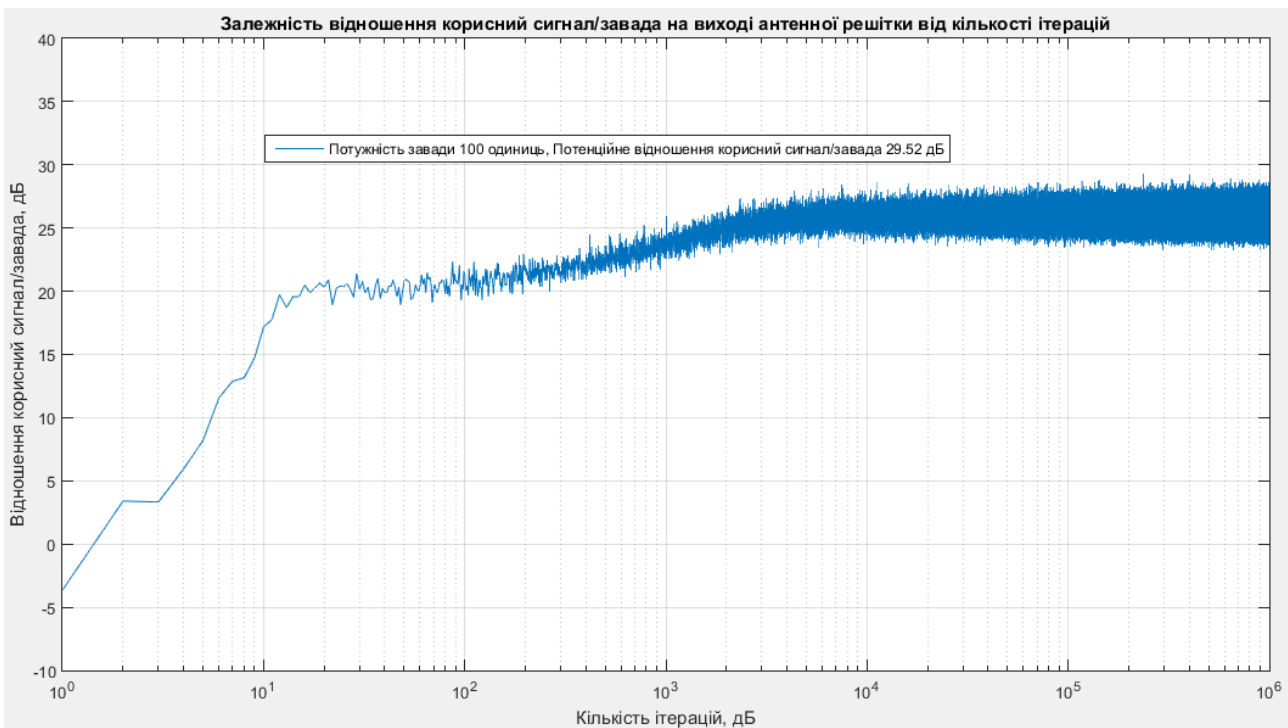


Рис.6. Залежність відношення корисний сигнал/завада на виході антенної решітки від кількості ітерацій при потужності завади 100 одиниць

Аналіз наведених на Рис.7 та Рис.8 діаграм направленості підтверджує висловлені вище припущення, що відсутність задових сигналів призводить до великої невизначеності при налаштуванні. Це проявляється в великій різниці між оптимальною діаграмою направленості та тією, що отримана при адаптації в області бокових пелюсток.

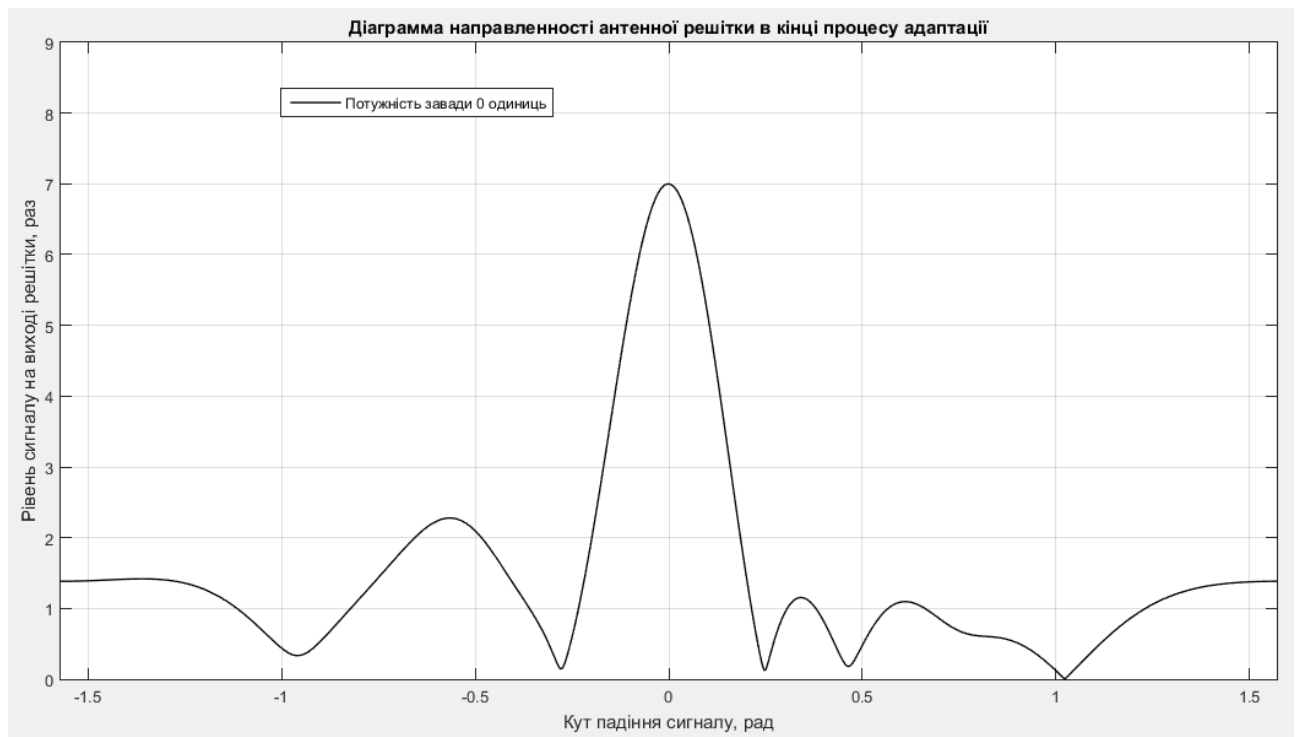


Рис.7. Діаграма направленості антенної решітки в кінці процесу адаптації при відносній потужності завади 0 одиниць

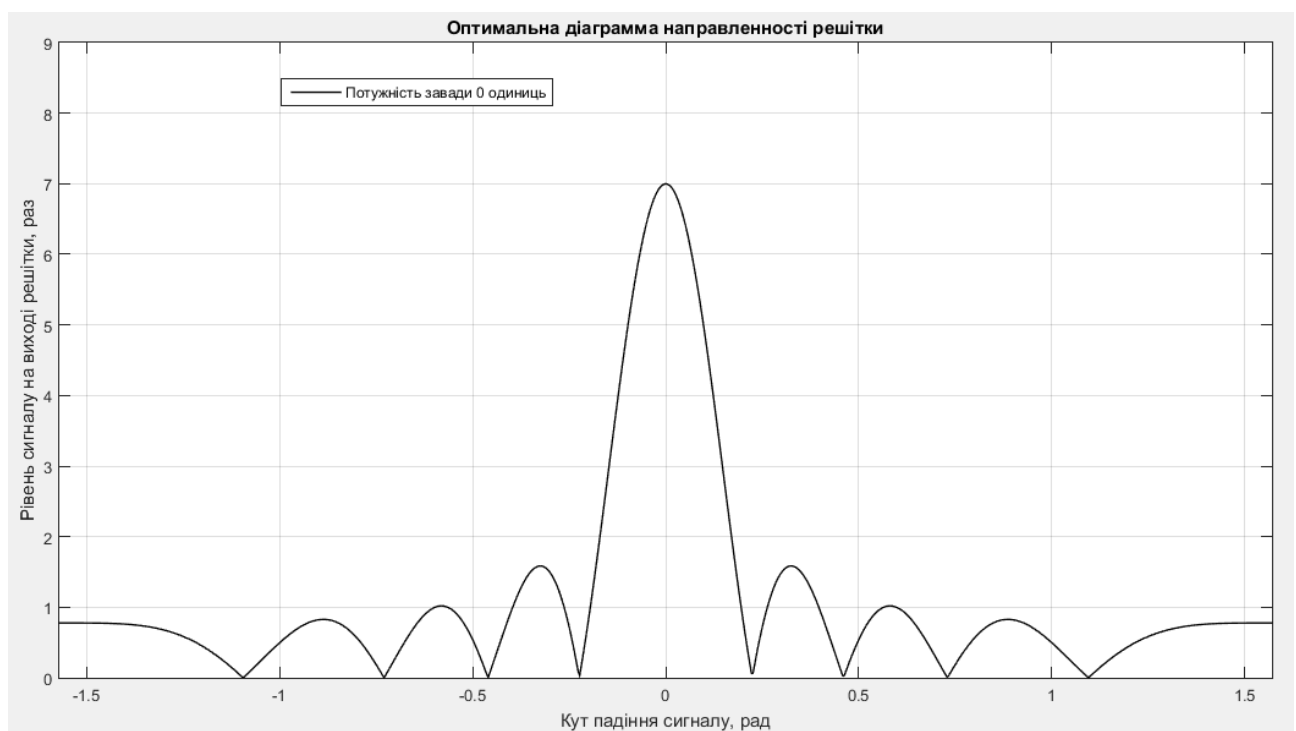


Рис.8. Оптимальна діаграма направленості решітки при відносній потужності завади 0 одиниць

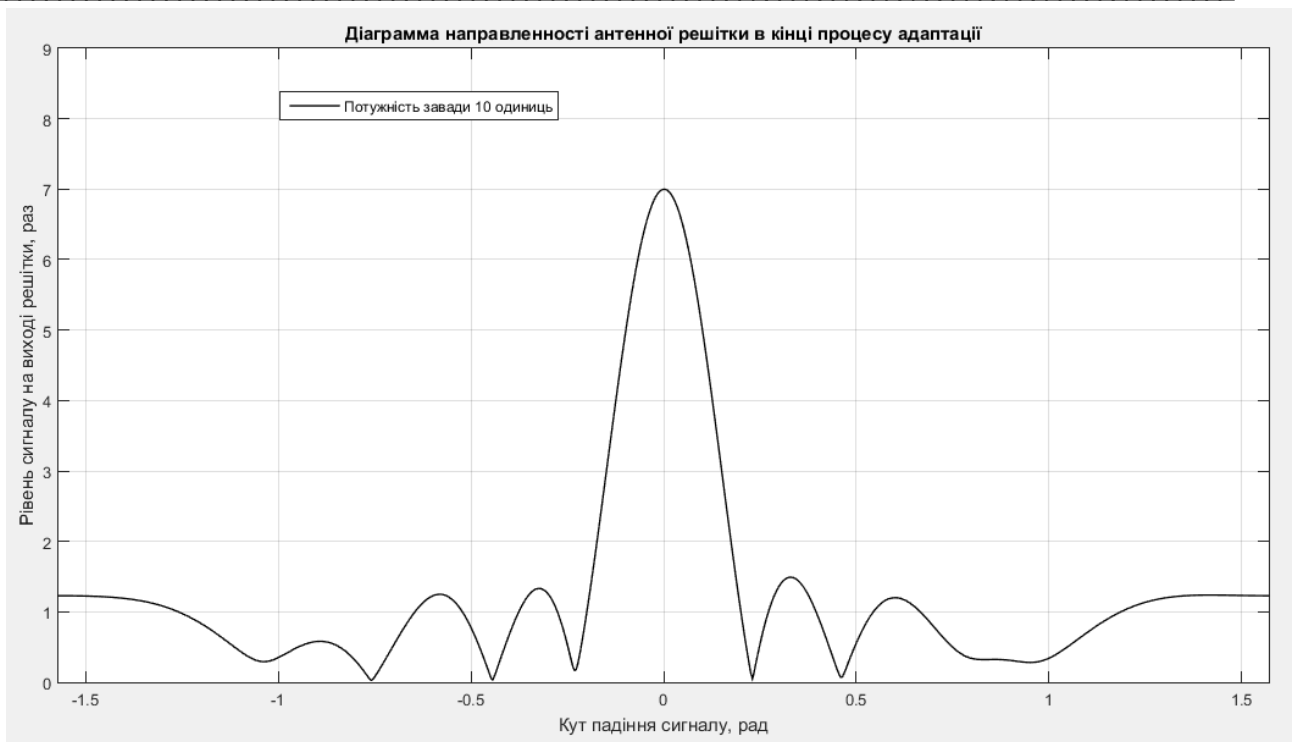


Рис.9. Діаграма направленності антенної решітки в кінці процесу адаптації при відносній потужності завади 10 одиниць

Але доти доки головна пелюстка залишається незмінною, це не впливає на досяжне відношення корисний сигнал/завада, як вбачається з Рис.2. Коли відносний рівень завади починає зростати, розходження між оптимальною діаграмою направленності та тією що отримана в процесі адаптації зменшується, що ілюструється кривими зображеними на Рис.9, Рис.10, Рис.11 і Рис.12.

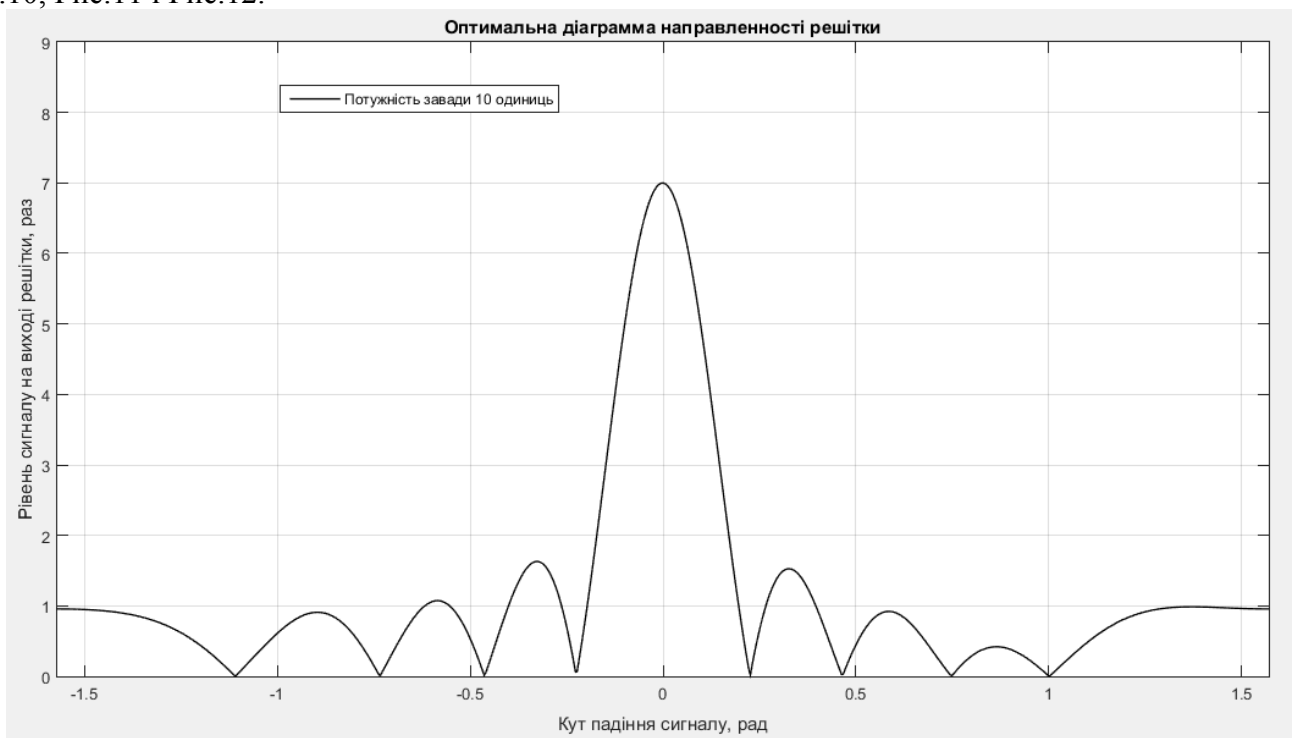


Рис.10. Оптимальна діаграма направленності решітки при відносній потужності завади 10 одиниць



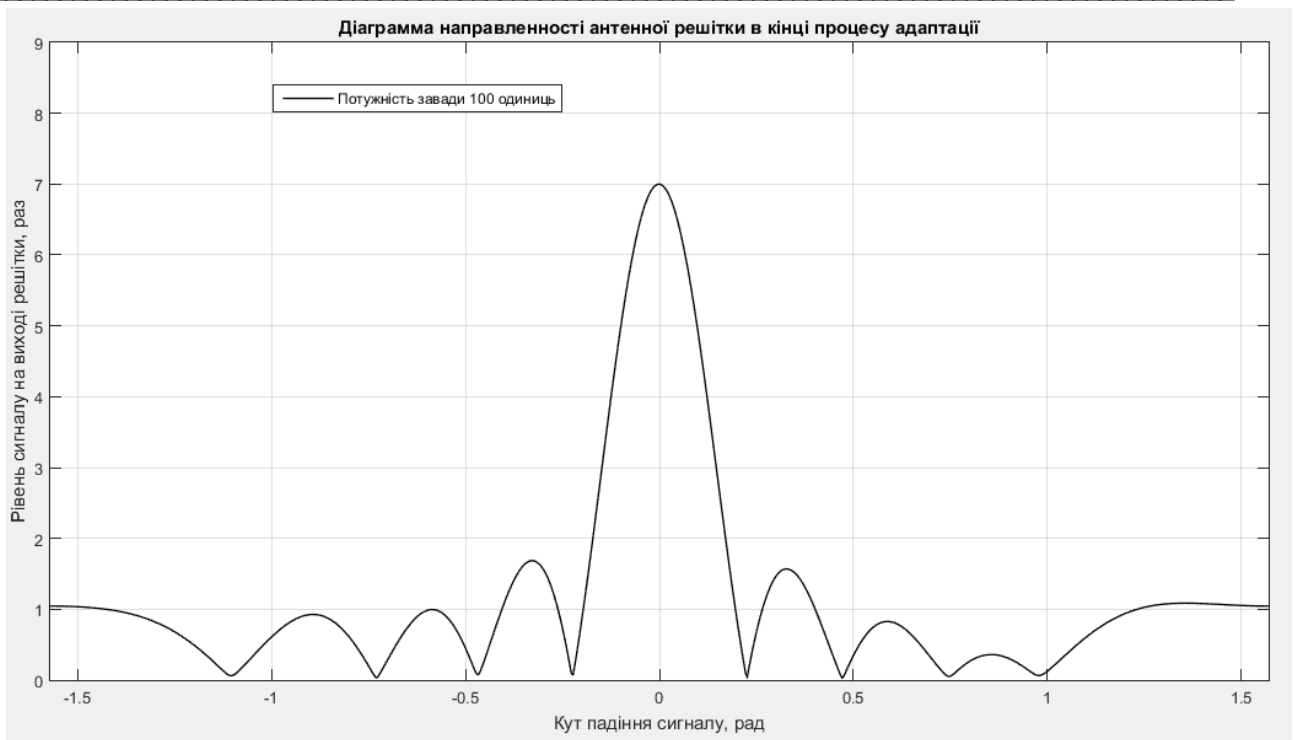


Рис.11. Діаграма направленності антенної решітки в кінці процесу адаптації при відносній потужності завади 100 одиниць

Особливу цікавість викликає той факт, що розходження між ідеальною і реальною діаграмами направленності зменшується не тільки під кутом падіння завадового сигналу один радіан, а і при інших кутах. Це може бути пов'язано з тим що завадовий сигнал проходячи через фазообертачі отримує інформацію про корисний сигнал, яка потім враховується в алгоритмі налаштування.

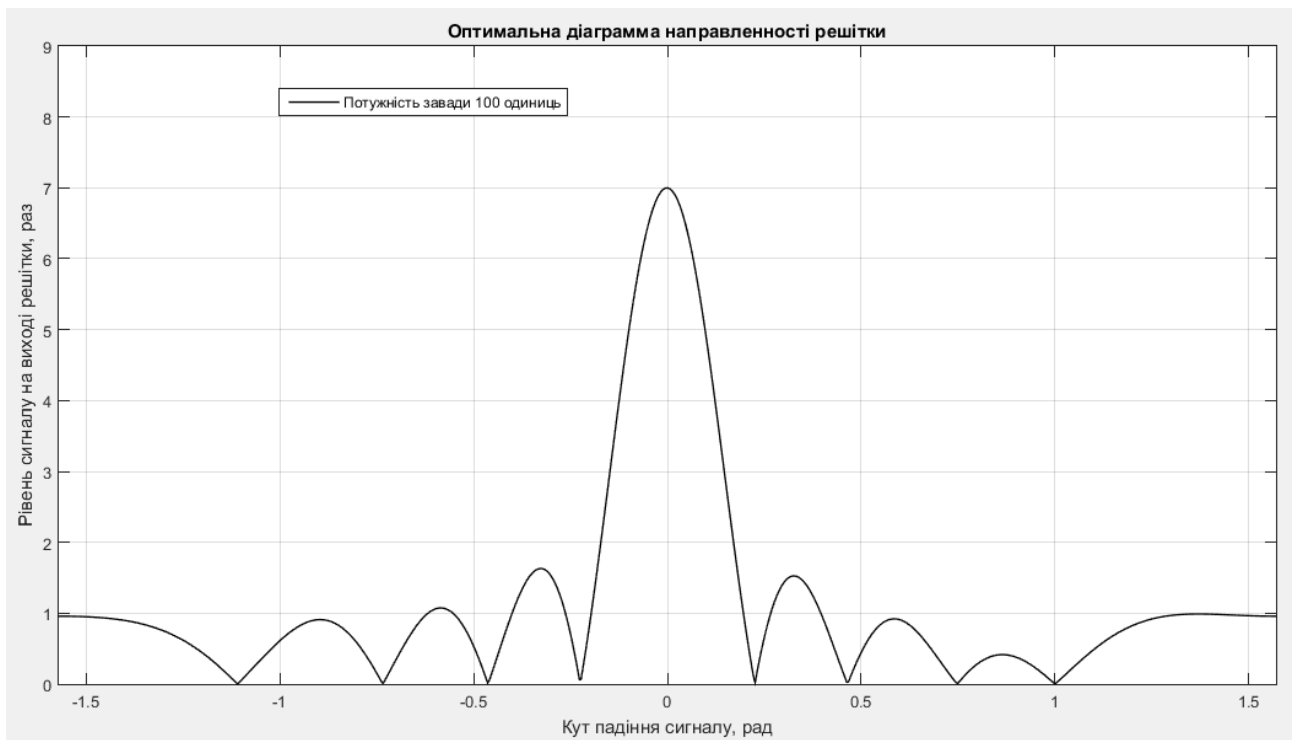


Рис.12. Оптимальна діаграма направленності решітки при відносній потужності завади 100 одиниць

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволяє зробити наступні загальні висновки:

1. Алгоритм (2) показав свою здатність забезпечувати потрібне відношення корисний сигнал/завада навіть при відсутності заводських сигналів або при їх малому рівні.
2. При відсутності заводських сигналів або їх малому рівні діаграми направленості по результатам налаштування суттєво відрізняються від оптимальних діаграм направленості в області бокових пелюсток, що підтверджує зроблені з початку припущення.
3. Якщо форма діаграми направленості є критичною, то пропонується алгоритм (2) покращити за рахунок порогового пристрою, що може включати адаптацію тільки при досягненні заводськими сигналами певного рівня.

### **Висновки**

Адаптивні антенні решітки знаходять все більше застосування в системах мобільного зв'язку, особливо в четвертому та п'ятому поколіннях. Одним з недоліків існуючих градієнтних алгоритмів є необхідність формування опорного сигналу для виконання процедури адаптації.

В роботі було досліджено розроблений раніше градієнтний алгоритм для адаптивної антенної решітки, який не потребує наявності опорного сигналу. Результати комп'ютерного моделювання підтвердили його ефективність навіть в ситуаціях коли при нульових або дуже малих значеннях потужностей заводських сигналів діаграми направленості за результатами адаптації суттєво відрізняються від оптимальних.

Зроблено припущення про можливість використання порогового пристрою при необхідності забезпечення оптимальної форми діаграми направленості антени.

Підтверджено можливість впровадження алгоритму (2) 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. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – Москва: Радио и связь, 1989. – 440 с.
5. Robert J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, 3rd ed. Boston: Artech House, 2018.
6. John Volakis, Antenna Engineering Handbook, 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
7. O.G. Pliushch, “Gradient Signal Processing Algorithm for Adaptive Antenna Arrays Obviating Reference Signal Presence,” presented at the IEEE International Scientific-Practical Conference PIC S&T, Kyiv, Ukraine, October 8–11, 2019, Paper 190.

### *Автори статті*

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

### *Authors of the article*

**Pliushch Oleksandr Grygorovich** – candidate of Science (technic), assistant professor, assistant professor of Department of Information and communications technology, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 18.10.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Вишнівський