

ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ АДАПТИВНОГО ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНЮ SMART- АНТЕНИ ДЛЯ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

Андрущенко О.В., Шумков І.М., Москалець М.В.

Кафедра «Інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського»,
Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

E-mail: mykola.moskalets@nure.ua,
oleh.andrushchenko@nure.ua,
ivan.shumkov@nure.ua

Abstract

The synthesis of mathematical model of linear antenna array in MATLAB software package is presented. The results of mathematical modeling are presented. The analysis and comparison of the performance of LMS and RLS algorithms is carried out. Various criteria were considered in the comparison, including amplitude response (grating coefficient), convergence time, acquisition and tracking of the desired useful signal. Recommendations on the applicability of Smart-antenna technologies in 5G New Radio mobile communication systems are given.

Ринок інтелектуальних антен (Smart Antenna) не є чимось новим, оскільки вони забезпечують ефективне покриття для 2G, 3G і LTE. Однак інтелектуальні антени 5G будуть необхідні для забезпечення підтримки мобільності для багатьох нових і вдосконалених додатків і послуг, таких як віртуальна реальність, самокеровані автомобілі, підключені транспортні засоби і передача голосу через 5G. Інтелектуальні антени покращать покриття 5G і оптимізують пропускну здатність, фокусуючи радіочастотні сигнали там, де вони найбільше потрібні. Крім того, інтелектуальні антени підвищують мобільність додатків і послуг 5G за рахунок полегшення безперервного з'єднання, що може стати особливо корисним на стиках покриття 5G [1,2].

Стільникові мережі 5G обіцяють поліпшити багато аспектів безпроводового зв'язку, підтримуючи розширені мобільні послуги, більшу масштабованість для систем IoT (Internet of Things) і наднадійний зв'язок для критично важливих додатків. Частина цих переваг базуватиметься на розвитку технологій 4G LTE, а також унікальних можливостях, які надає 5G New Radio (5G NR), що базується на новій інфраструктурі, яка підтримує обладнання RAN міліметрового діапазону (mmWave) [3].

Антени 5G можна буде знайти практично скрізь у мегаполісах, але цього буде недостатньо. Хоча різко збільшене покриття, безумовно, підтримає багато ранніх додатків 5G, таких як фіксований безпроводовий зв'язок (альтернатива інтернет-провайдерам, транзитний і магістральний зв'язок), цього буде недостатньо для підтримки безперервного покриття мобільності 5G. Це буде життєво важливо для певних додатків, таких як самокеровані автомобілі і підключені транспортні послуги, які часто вимагають високої пропускну здатності на вимогу.

У порівнянні зі звичайними антенами, інтелектуальні антени мають такі переваги, як збільшення потужності, розширення зони покриття, збільшення смуги пропускання, зменшення багатопроменевих завмирань. Ці антени мають дві основні функції, а саме: оцінка напрямку приходу сигналів (DOA – Direct of Arrival) і формування променя (Beamforming).

Інтелектуальні антенні системи оцінюють напрямок приходу сигналу за допомогою таких методів, як класифікація множинних сигналів (MUSIC – Multiple signal classification), матричний метод або оцінка параметрів сигналу за допомогою методів обертальної інваріантності (ESPRIT – Estimation OF Signal Parametrs Via Rotational) [3].

Проблематика формування променя смарт-антен

Методи формування променя можна розділити на дві основні групи: фіксоване формування променя та адаптивне формування променя. У першому випадку завади послаблюються, але не придушуються, і система, як правило, може бути реалізована за розумною ціною. Адаптивні антени, навпаки, вимагають прийняття складних алгоритмів обробки сигналу для того, щоб направити головний промінь у потрібну сторону та придушити небажані джерела. Цей другий підхід призводить до оптимальних характеристик, але є більш дорогим і потребує значних зусиль для реалізації.

Формування променя являє собою використання високо сфокусованої радіочастотної енергії, яка спрямовується в точку потреби/використання. Це на відміну від ранніх технологій, що застосовувалися в стільниковому зв'язку, які були всеспрямованими за своєю природою. Формування променя використовується з 5G, оскільки більш високі частоти дуже схильні до загасання. Радіочастотна енергія фокусується у вузькому промені саме там, де вона необхідна, замість того, щоб випромінювати ту ж саму енергію на широкій площі. Формування променя особливо корисне для 5G New Radio, оскільки більш високочастотний радіосигнал міліметрового діапазону схильний до згасання з відстанню і втрат, викликаних зіткненням з об'єктами (будівлями, автомобілями, листям і т.д.). Більш спрямований пучок радіочастотної енергії допомагає забезпечити більшу ймовірність оптимальної смуги пропускання та якості сигналу. Однак, важливо відзначити, що пряма видимість все ще залишається проблемою, оскільки переваги формування променя зменшуються з ослабленням сигналу. Поряд з цим існує два класи вимог до смарт-антен (адаптивних антенних решіток): для встановленого та перемітного стану відповідно. Обидва класи залежать від того, чи досягли вагові коефіцієнти значень, що встановилися в стаціонарному середовищі, або коригуються у відповідь на зміни середовища поширення сигналу. Вважаючи, що опорний сигнал для адаптивного алгоритму виходить за допомогою апріорно відомого в приймачі тимчасового опорного сигналу під час фактичної передачі даних, адаптивна корекція вагових коефіцієнтів може бути продовжена за допомогою спрямованого зворотного зв'язку або за допомогою вагових коефіцієнтів, отриманих в кінці періоду налаштування вагового коефіцієнту [4]. Підстроювання вагового вектору до нестаціонарного середовища для кожної вибірки може здійснюватися за допомогою адаптивних алгоритмів: найменшого середньоквадратичного відхилення LMS (Least Mean Squares) та рекурсивного алгоритму найменших квадратів RLS (Recursive Least-Squares).

Алгоритми адаптивного формування променя смарт-антен і синтез моделі

Найімовірніше, найбільш поширеним адаптивним алгоритмом фільтрації, використовуваним у низці систем зв'язку, є алгоритм LMS (Least Mean-Square) [5]. Він набув популярності завдяки низькій обчислювальній складності та високій стійкості. Він включає нові вимірювання та забезпечує лінійну ітераційну мінімізацію середньоквадратичного відхилення/помилки. Алгоритм LMS забезпечує зміну вагового вектору $w(k)$ вздовж напрямку розрахункового градієнта на основі методу якнайшвидшого негативного спуску [4].

На відміну від LMS-алгоритму [5], в якому для корекції вагового вектору використовується метод якнайшвидшого спуску, адаптивний алгоритм найменших квадратів апроксимує рішення Вінера безпосередньо за допомогою найменших квадратів без додаткових витрат на апроксимацію процедури оптимізації. У методі найменших квадратів ваговий вектор $w(k)$ підбирається таким чином, щоб забезпечувалася мінімізація цільової функції, що складається з суми квадратів помилки за інтервал часу, тобто рекурсивна мінімізація рішення найменшого квадратів LS (least-square) [5].

Для порівняння продуктивності алгоритмів було проведено імітаційне моделювання, в якому використовувалися параметри, що представлені в табл. 1.

Проведемо оцінку продуктивності роботи алгоритмів LMS і RLS смарт-антени в середовищі MATLAB. Нехай кількість елементів $N = 8, 12, 16$ -елементні решітки з кроком (у першому випадку $d = 0.5\lambda$, у другому випадку $d = 0.25\lambda$ і в третьому випадку $d = 0.125\lambda$) має сигнал, що надходить під кутом $\theta_0 = 30^\circ$, що інтерферує під кутом $\theta_1 = -60^\circ$.

Таблиця 1. Параметри, які використовувалися під час моделювання

Параметр	Значення	
	Для LMS	Для RLS
Кількість елементів решітки (N)	8,12,16	8,12,16
Відстань між елементами (d)	0.5 λ, 0.25λ, 0.125λ	0.5 λ, 0.25 λ, 0.125λ
DOA бажаного сигналу	30°	30°
DOA сигналу завади	-60°	-60°
Розмір кроку (μ)	0.02	-
Кількість ітерацій (it)	100	50
Коефіцієнт прискорення (α)	-	0.9

Ми припускаємо, що коефіцієнт бажаного сигналу визначається $s(k)$, де $s(k) = \cos(2 * \pi * t(k) / T)$; з $T = 1$ мс і $t = (1:100) * T / 100$, і коефіцієнт сигналу, що заважає визначається $\bar{x}_i(k) = \bar{a}_{i_i}(k)$, де $i(k) = \text{randn}(1, 100)$. Обидва сигнали практично ортогональні на часовому інтервалі T. Нехай бажаний сигнал $d(k) = s(k)$, ми використовуємо алгоритм найменшого середнього квадрата, для вирішення оптимальних ваг решітки. Припускаємо, що початковий ваговий коефіцієнт решітки дорівнює нулю. Ми припускаємо 100 ітерацій.

Для написання процедури RLS, щоб вирішити завдання для вагових коефіцієнтів. Бажаний коефіцієнт сигналу визначається $x_S(k) = \bar{a}_{0S}(k)$, $s(k) = \cos(2 * \pi * t(k) / T)$; з $T = 1$ мс. Нехай $K = 50$ часових вибірок, таких, що $t = (0 : K - 1) * T / (K - 1)$. Ми припускаємо, що коефіцієнт сигналу, що заважає визначається $\bar{x}_i(k) = \bar{a}_{i_i}(k)$, де $i(k) = \sin(\pi * t(k) / T)$. Нехай бажаний сигнал $d(k) = s(k)$. Щоб зворотна кореляційна матриця стала сингулярною, ми додаємо в систему шум з дисперсією $\sigma_n^2 = 0.01$. Почнемо з припущення, що ваговий коефіцієнт решітки дорівнює нулю, отже $\sigma_n^2 \bar{w}(1) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]T$. Встановимо коефіцієнт прискорення $\alpha = 0.9$.

Результати моделювання

На рис. 1а представлений амплітудний відгук алгоритму найменшого середнього квадрата для різної кількості елементів решітки на відстані $d=0.5\lambda$. Очевидно, що при використанні алгоритму LMS відгук має амплітуду, рівну одиниці при бажаному куту та повністю усуває небажаний сигнал. Використання 12 елементів у решітках покращило відгук алгоритму за рахунок звуження смуги відгуку.

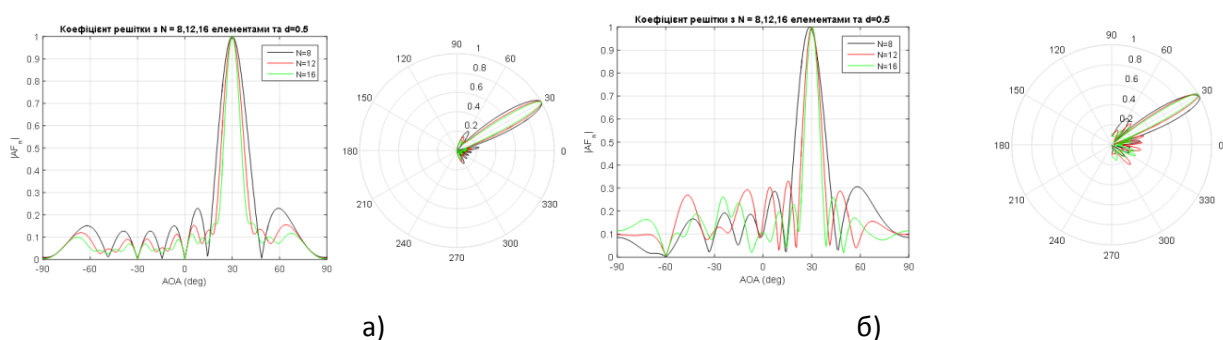


Рис. 1. Графіки коефіцієнтів решітки
 а) для алгоритму LMS ($d=0.5\lambda$); б) для алгоритму RLS ($d=0.5\lambda$).

Результати моделювання роботи алгоритму RLS показані на рис. 1б. Результати показують, що відгук краще при використанні більшої кількості елементів. Відгук показує амплітуду приблизно 0.3 при деяких небажаних кутах приходу. Такі значення вважаються недоліками алгоритму.

Адаптивна схема LMS полягає у тому, що алгоритм має пройти багато ітерацій до задовільної збіжності. На рис.2а показано, як вихід решітки набуває та відстежує бажаний сигнал після приблизно 60 ітерацій для алгоритму LMS. На рисунку 2.б показано, як вихід решітки приймає та відстежує бажаний сигнал безпосередньо для алгоритму RLS.

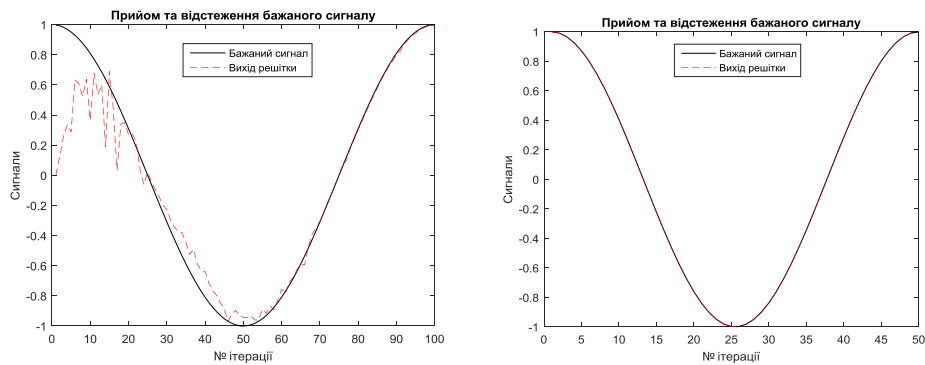


Рис. 2. – Отримання та відстеження бажаного сигналу
а) для алгоритму LMS; б) для алгоритму RLS

Для адаптивної схеми RLS показано, що збіжність вагових коефіцієнтів алгоритму RLS сходять до оптимальних значень лише за 15 ітерацій. Ця збіжність набагато швидше, ніж у LMS (60 ітерацій).

Аналіз результатів моделювання

Проаналізовано вплив кількості антенних елементів (N) на формування променя, і показано, що зі збільшенням кількості елементів антени ширина променя зменшується, роблячи решітку більш спрямованою, тим самим покращуючи формування променя. Можна бачити, що алгоритм LMS має кращу продуктивність, за винятком того, що йому властива повільна швидкість збіжності. Алгоритм RLS покращує швидкість збіжності ціною більшої обчислювальної складності.

Висновки

Отримані в роботі результати дають змогу здійснювати раціональний вибір адаптивного алгоритму формування променя з метою подальшої реалізації схеми множинного просторово-часового абонентського доступу.

Наявність значної кількості антенних елементів Smart-антени та необхідного ресурсу обчислення обумовлюють ефективне використання в системах мобільного зв'язку 5G New Radio алгоритму RLS. Якщо є в наявності достатня кількість антенних елементів, а обчислювальна потужність обмежена, то найбільш ефективним в системах мобільного зв'язку є застосування алгоритму LMS.

Інтелектуальні антени корисні для оптимізації LTE, але вони абсолютно необхідні для забезпечення підтримки мобільності для багатьох нових і вдосконалених додатків і послуг 5G, таких як віртуальна реальність, самокеровані автомобілі, підключені транспортні засоби і передача голосу через 5G (Vo5G).

Література

1. <https://www.prnewswire.com/news-releases/worldwide-5g-smart-antenna-industry-to-2027---multiple-input-multiple-output-smart-antennas-represent-the-fastest-growing-type-301510289.html>
2. <https://www.isemag.com/5g-6g-and-fixed-wireless-access-mobile-evolution/article/14268016/the-role-of-smart-antennas-in-optimizing-5g>
3. <https://www.automation.com/en-us/articles/2016-2/deployment-of-smart-antennas-in-5g-research>
4. Поповский В.В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах: учебник / В.В. Поповский, В. Ф. Олейник. – Харьков: СМІТ, 2011. – 362 с.
5. Баланис К. А. Введение в смарт-антенны / К. А. 1. Баланис, П. И. Иоанидес., 2012. – 200 с. – (Техносфера).