

## ВИКОРИСТАННЯ АДАПТИВНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕРЕЖІ LTE-A

**Маковесенко Д. О.** – канд. техн. наук, доц. каф. телебачення та радіомовлення, Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Україна.

**Сідень С. В.** – канд. техн. наук, ст. викл. каф. телебачення та радіомовлення, Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Україна.

**Пилявський В. В.** – канд. техн. наук, ст. викл. каф. телебачення та радіомовлення, Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Зроблено пропозиції щодо можливості використання адаптивних антенних решіток для збільшення пропускної здатності у мережах мобільного зв'язку LTE-A та проаналізовано вигравш від її використання у порівнянні зі стандартним типом антени базових станцій.

**Мета.** Метою статті є аналіз пропускної здатності мережі мобільного зв'язку LTE-A на висхідній лінії при використанні адаптивної лінійної еквідистантної антенної решітки.

**Метод.** Для досягнення результату була розроблена комп'ютерна модель аналізу заводової обстановки мережі мобільного зв'язку у вигляді плоскої регулярної гексагональної антенної решітки, яка складається з 7 трьох секторних чарунок. Для оцінки вигравшу від використання адаптивних антенних решіток було проаналізовано два варіанти: при використанні стандартної антенної решітки мережі LTE-A, та адаптивної лінійної еквідистантної антенної решітки. При проведенні моделювання було виконано 100 випадкових розміщень абонентів корисного та заводових сигналів та розраховано мінімальний, максимальний та середній вигравш від використання адаптивних антенних решіток. У середньому значення коефіцієнта підсилення для адаптивної антенної решітки в напрямку абонентської станції, що створює корисний сигнал більше на 5,69 дБ порівняно з стандартною антенною решіткою мережі LTE-A. У той же час є суттєве зменшення коефіцієнта підсилення адаптивної антени у напрямку заводових абонентських станцій, а саме, для тих, що мають найбільший рівень завади, вигравш становить 32,84 дБ та 28,33 дБ відповідно. Для наочного показу вигравшу у якісних характеристиках мережі було проведено аналіз пропускної здатності для різних типів антен. Представлено розподіл пропускної здатності (розмір транспортного блоку) для 50 ресурсних блоків при використанні адаптивної еквідистантної лінійної антенної решітки порівняно з стандартною антенною решіткою.

**Результати.** Показано, що завдяки використанню адаптивних антенних систем, середня пропускна здатність збільшується з 11 Мбіт/с до 35 Мбіт/с для усіх типів каналів поширення, що розглядалися.

**Висновки.** У статті запропоновано використання адаптивних антенних решіток для збільшення пропускної здатності мережі LTE-A. Моделювання пропускної здатності для 50 ресурсних блоків показало, що в умовах наявності внутрішньосистемних завод при використанні стандартних антен базових станцій середня пропускна здатність становить від 11,2 Мбіт/с до 12,3 Мбіт/с. У той же час завдяки використанню адаптивних антенних систем середня пропускна здатність збільшується з 11 Мбіт/с до 35 Мбіт/с для усіх типів каналів багатопроменевого поширення, що розглядалися.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** адаптивна модуляція та кодування, пропускна здатність, адаптивна антенна, транспортний блок, завада.

### АБРЕВІАТУРИ

ААР – адаптивна антенна решітка;  
АЦП – аналого-цифрове перетворення;  
АМС – Adaptive Modulation and Coding (адаптивна модуляція та кодування);  
BLER – Block Error Rate (коефіцієнт помилок блоку);  
CQI – Channel Quality Indicator (індикатор якості каналу);  
EPA – Extended Pedestrian A (розширена пішоходна модель);  
ETU – Extended Typical Urban (розширена типова міська модель);  
EVA – Extended Vehicular A (розширена модель для транспортних засобів);  
LTE – Long Term Evolution (довгострокова еволюція);  
MCS – modulation coding scheme (схема модуляції та кодування);

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (мультиплексування з ортогональним частотним поділом);  
PUSCH – Physical Uplink Shared Channel (фізичний висхідний спільний канал);  
RB – resource block (ресурсний блок);  
TBS – Transport Block Size (розмір транспортного блоку);  
SNR – Signal-to-Noise Ratio (відношення сигнал/шум).

### НОМЕНКЛАТУРА

$f$  – робоча частота;  
 $G_k(\varphi, \theta)$  – коефіцієнт підсилення антени базової станції в напрямку заводової абонентської станції;  
 $L_k$  – втрати поширення радіохвиль для траси заводова абонентська станція – базова станції центральної чарунки;  
 $N$  – кількість елементів антенної решітки;

$n_s$  – кількість елементів у векторі  $\theta_s$  ;  
 $n_n$  – кількість елементів у векторі  $\theta_n$  ;  
 $P_n$  – рівень власних шумів приймача базової станції;  
 $P_{rx}$  – потужність сигналу абонентської станції на вході приймача базової станції;  
 $P_{trmk}$  – потужність передавача абонентської станції;  
 $\theta_{s_k}$  – вектор корисних сигналів;  
 $\theta_{n_k}$  – вектор небажаних (завадових) сигналів;  
 $w_i$  – комплексні вагові коефіцієнти в блоці формування антенної решітки.

## ВСТУП

Підвищення швидкості передавання в сучасних мережах рухомого зв'язку є актуальним завданням для будь-якого покоління мережі. Технології четвертого покоління рухомого зв'язку 4G LTE забезпечують подальший розвиток за рахунок підвищення швидкості передачі даних та кращої якості обслуговування.

LTE заснований на множинному доступі ортогонального частотного поділу OFDMA і досягає високих швидкостей передачі даних, поєднуючи високу пропускну здатність, модуляцію більш високого порядку та просторове мультиплексування.

При побудові мережі рухомого зв'язку взаємні завади в мережі є суттєвим фактором, що погіршує відношення  $SNR$  та зменшують пропускну здатність в радіоканалі.

Одним із підходів, що зменшує внутрішньосистемні завади в мережі рухомого зв'язку є використання адаптивних антенних решіток.

**Об'єктом дослідження** є – процес моделювання пропускну здатності в мережі рухомого зв'язку при застосуванні адаптивних антенних решіток.

**Предметом дослідження** є – методи підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу в мережі LTE-A.

**Метою даної статті** є запропонування адаптивної антенної решітки, що збільшує пропускну здатність мережі рухомого зв'язку LTE-A на висхідній лінії у порівнянні зі стандартними антенами базових станцій мереж 4-го покоління.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Очікуваним результатом даного дослідження є збільшення пропускну здатності мережі рухомого зв'язку LTE-A на висхідній лінії за рахунок зменшення внутрішньосистемних завад, що створюються абонентськими станціями в сусідніх чарунках.

За рахунок використання запропонованої адаптивної антенної решітки очікується зменшення сумарного рівня завади  $P_{int_v}$  на вході базової станції. Для оцінки ефективності застосування антенної решітки пропонується моделювання реальної завадової обстановки в

мережі LTE-A та постійна оцінка індексу модуляційно-кодової схеми для  $I_{MCS}$  відповідно до отриманого значення  $SNR$  на вході базової станції. У результаті збільшення пропускну здатності при виборі запропонованої антенної решітки оцінюється розміром транспортного блоку пакетів в мережі LTE-A.

$$TBS_i^{(max)} = \max_{TBS_i \in I_{mcs_i}} \left\{ \begin{array}{l} \min(G_k(\varphi, \theta)), \theta \in \theta_{n_k}, \varphi = \text{const} \\ \max(G_k(\varphi, \theta)), \theta \in \theta_{n_s}, \varphi = \text{const} \end{array} \right\}. \quad (1)$$

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

LTE Реліз 12 (званий LTA-Advanced або LTE-A) ввів схему модуляції вищого порядку для поліпшення спектральної ефективності та пропускну здатності системи [1]. Це було досягнуто введенням 256-QAM і, отже, зміною інших системних вимог, таких як розмір транспортного блоку [2]. В LTE реалізовано функцію адаптивної модуляції та кодування, що враховує змінні умови стану радіоканалу, щоб забезпечити користувачеві оптимальну швидкість передачі даних. Таким чином, при хороших умовах радіоканалу забезпечується висока швидкість передачі даних; при цьому низька швидкість передачі даних забезпечується, коли в каналі умови погіршуються. Отже, покращення умов поширення радіохвиль за рахунок технології AMC буде збільшувати швидкість передачі в мережі.

Термін «адаптивна антенна решітка» вперше було використано в 1959 році, для опису самофазованої антенної решітки [3]. Але можливість їх використання стало можливим відносно недавно, що пов'язано зі стрімким розвитком мікроелементної бази та росту обчислювальних можливостей.

ААР мають багато переваг перед звичайними антенними решітками систем мобільного зв'язку. Основними з них є можливість швидкого налаштування схеми формування променя та можливість його контролю. Комбінуючи використання адаптивних антенних решіток та схеми адаптивної модуляції та кодування, можна значно підвищити пропускну здатність мережі [4].

В роботах [5–6] відзначається, що за рахунок адаптивного формування променів та просторового розподілу абонентів, що стає можливим за рахунок використання адаптивних антенних решіток, можна значно підвищити пропускну здатність мереж 4-го покоління. Але на даний час числові показники, що наочно будуть демонструвати збільшення пропускну здатності поки не приведені.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Мережа LTE дозволяє адаптуватися абонентському терміналу шляхом застосування різних режимів модуляції і кодування. Кожна з даних MCS може застосовуватися при регламентованому пороговому значенні  $SNR$ , що в свою чергу залежить від умов поширення в каналі радіозв'язку. Останні можуть бути модельовані з умов розповсюдження і типу каналу. Фактично при розрахунку втрат для кожної

MCS можна визначити радіус зони покриття однієї БС (рис. 1).

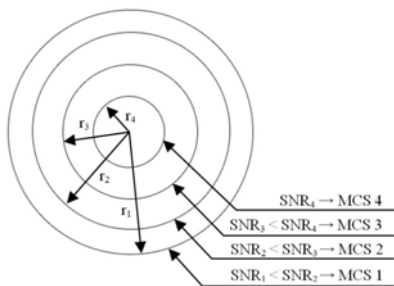


Рисунок 1 – Залежність відношення SNR від зони покриття окремої MCS

Адаптивна зміна модуляційно-кодової схеми, як основна частина процедури AMC, включає в себе можливість визначення порогового значення SNR і за допомогою зворотного зв'язку, через індикатори якості каналу CQI [2], змінювати параметри передачі і тип MCS. Залежно від типу і якості каналу зв'язку E-UTRA може змінювати сценарій процедури AMC при відомих значеннях коефіцієнта помилкових блоків BLER, що знаходяться в індикаторах якості каналу CQI. При цьому зміна MCS можлива лише за умови що значення BLER не може бути менше  $10^{-1}$ .

Для більш зручної оцінки якості каналу BLER прив'язаний до SNR для кожної з існуючих CQI / MCS [7]. Технічні характеристики 3GPP [8] описують канали низхідної лінії зв'язку та висхідної лінії зв'язку, які можуть бути використані для моделювання будь-яких MCS для виділених блоків ресурсів та відповідного розміру транспортного блоку. Параметри для будь-якого індексу MCS для фізичного загального каналу висхідної лінії зв'язку PUSCH можна отримати за допомогою списку індексу MCS для індексу TBS для PUSCH. Для LTE-A PUSCH визначено 29 варіантів MCS. Для  $0 \leq I_{MCS} \leq 28$  UE спочатку визначає індекс TBS ( $I_{TBS}$ ) за допомогою  $I_{MCS}$ .

Для LTE-A PUSCH визначено 29 варіантів MCS. Для  $0 \leq I_{MCS} \leq 28$  UE спочатку визначає індекс TBS ( $I_{TBS}$ ) за допомогою  $I_{MCS}$ . У табл. 1 показано залежність спектральної ефективності від MCS в мережі LTE-A для 50 RB каналу PUSCH.

Багатопроменевий канал поширення визначається комбінацією профілю затримки з багатозатримкою і максимальної частоти доплерівського режиму, яка може бути 5, 70 або 300 Гц. Специфікація 3GPP [8] описує компоненти багатопроменевих каналів для розширеної пішохідної моделі А EPA, розширеної моделі автомобіля А EVA та розширеної моделі міста ETU. В [9] визначає відношення SNR для кожного MCS для висхідного каналу.

На рисунках 2–3 показано MCS як функція співвідношення SNR для швидкості помилок блоку BLER  $10^{-1}$ , які отримані відповідно до [9].

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для оцінки заводової обстановки в мережі LTE-A розглядається періодична структура у вигляді плоскої регулярної гексагональної решітки, що містить сім чарунок та три секторні антени у кожній чарунці (рис. 4). В центральній чарунці працює абонентська станція, з потужністю передавача  $P_{trm}$ . В чарунках першого круга заводи працюють абонентські станції, що створюють заваду  $P_{intk}$  на вході приймача базової станції.

Сумарний рівень завади на вході приймача базової станції від усіх абонентських станцій дорівнює:

$$P_{int\Sigma} = \sum_{k=1}^N P_{trmk} - L_k - G_k(\varphi, \theta). \quad (2)$$

Таблиця 1 – Параметри MCS 50 RB для каналу PUSCH

$I_{MCS}$	Модуляція	Швидкість коду	Спектральна ефективність (Біт/Символ)	$I_{MCS}$	Модуляція	Швидкість коду	Спектральна ефективність (Біт/Символ)
0	QPSK	0,08	0,1575	15	QAM-16	0,40	1,6056
1	QPSK	0,10	0,2048	16	QAM-16	0,43	1,7367
2	QPSK	0,13	0,2521	17	QAM-16	0,47	1,8678
3	QPSK	0,16	0,3249	18	QAM-16	0,52	2,0862
4	QPSK	0,21	0,4123	19	QAM-16	0,56	2,2583
5	QPSK	0,25	0,4997	20	QAM-16	0,61	2,4330
6	QPSK	0,29	0,5871	21	QAM-64	0,41	2,4330
7	QPSK	0,35	0,7054	22	QAM-64	0,43	2,6078
8	QPSK	0,40	0,7928	23	QAM-64	0,48	2,8963
9	QPSK	0,45	0,9093	24	QAM-64	0,52	3,1148
10	QPSK	0,50	0,9967	25	QAM-64	0,54	3,2240
11	QAM-16	0,25	0,9967	26	QAM-64	0,58	3,4789
12	QAM-16	0,28	1,1278	27	QAM-64	0,60	3,6072
13	QAM-16	0,33	1,3025	28	QAM-64	0,70	4,1752
14	QAM-16	0,37	1,4746				

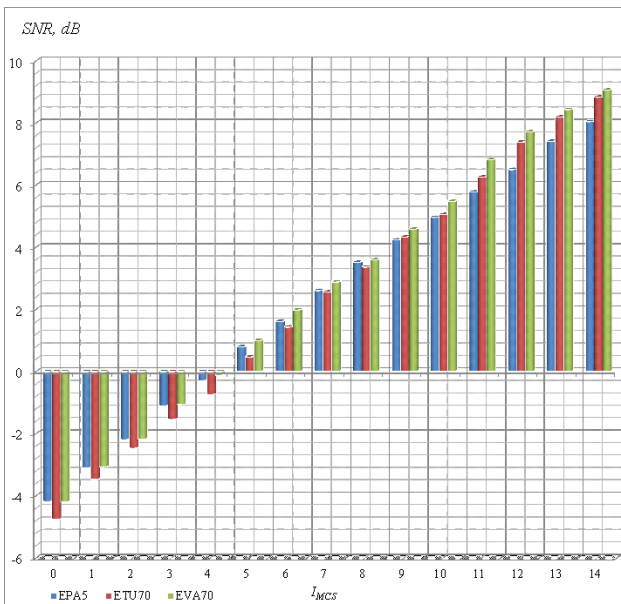


Рисунок 2 – MCS як функція відношення SNR для випадку  $BLER=10^{-1}$  ( $0 \leq I_{MCS} \leq 14$ )

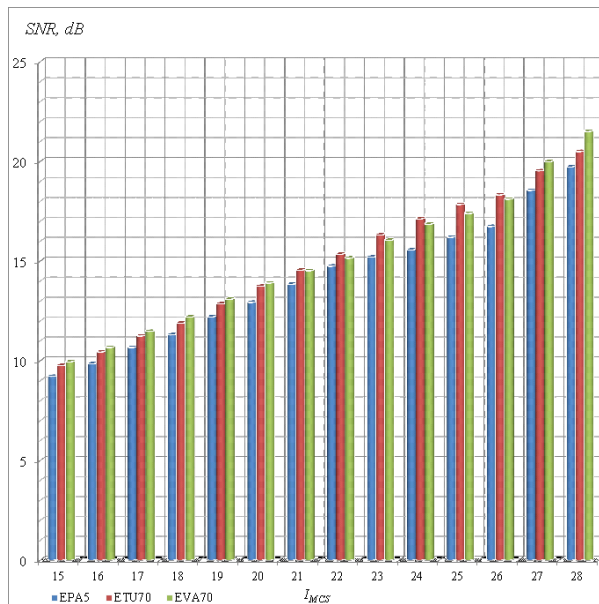


Рисунок 3 – MCS як функція відношення SNR для випадку  $BLER=10^{-1}$  ( $15 \leq I_{MCS} \leq 28$ )

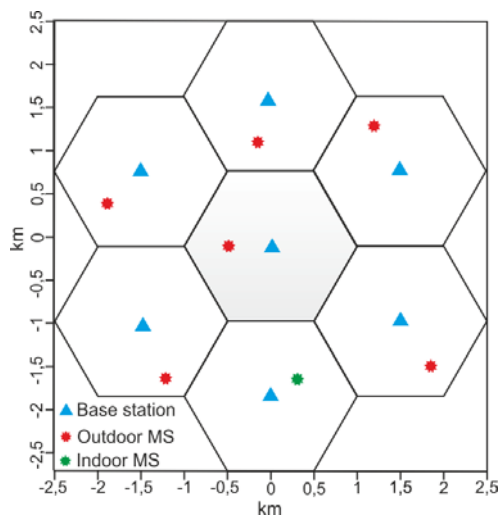


Рисунок 4 – Мережа E-UTRA з розподіленими користувачами

Застосування адаптивної антенної системи може зменшити рівень завади за рахунок адаптивної зміни діаграми спрямованості антени і зменшення рівня завади від відповідної абонентської станції.

Оцінка запропонованої адаптивної антенної системи здійснюється шляхом моделювання завадової обстановки мережі рухомого зв'язку, шляхом вибору розміру чарунки, щільності розташування абонентських станцій, висот встановлення антен базової та абонентських станцій. Для заданих вихідних даних визначається сумарний рівень завади на вході приймача базової станції, відповідно до (3), та результуюче значення відношення сигнал/(завада + шум) за допомогою виразу:

$$SINR = \frac{P_{rx}}{P_n + \sum_{k=1}^N P_{int_k}} \quad (3)$$

Для першого моделювання використовується стандартна діаграма спрямованості антени, параметри якої наведено в Рекомендації ITU-R F.1336-4 [10]. На другому етапі використовується запропонована адаптивна антенна решітка, опис якої наведено нижче.

При оцінці запропонованої антени визначається індекс модуляційно-кодової схеми ( $I_{MCS}$ ) відповідно до отриманого значення сигнал/(шум+завада) та розмір транспортного блоку..

Однією з можливих технологій, що активно впроваджується у системи мобільного зв'язку, є використання адаптивних антенних решіток. ААР мають ряд переваг над антенними решітками, які використовуються у сучасних системах мобільного зв'язку. Використання ААР дозволяє швидко змінювати та формувати необхідні характеристики спрямованості антени (такі як діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення).

У рекомендації ITU відзначено, що використання адаптивних антенних технологій є одним з методів зменшення рівнів завад та підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу [11].

В адаптивних антенних системах зв'язок між користувачем і базовою станцією забезпечується за рахунок додавання просторового виміру. З метою оптимізації робочої характеристики бездротової системи адаптивна антена може динамічно змінювати форму діаграми спрямованості в залежності від зовнішніх факторів.

Функціональна блок-схема цифрового сигнального процесора адаптивної антенної решітки показана на рис. 5 [12].

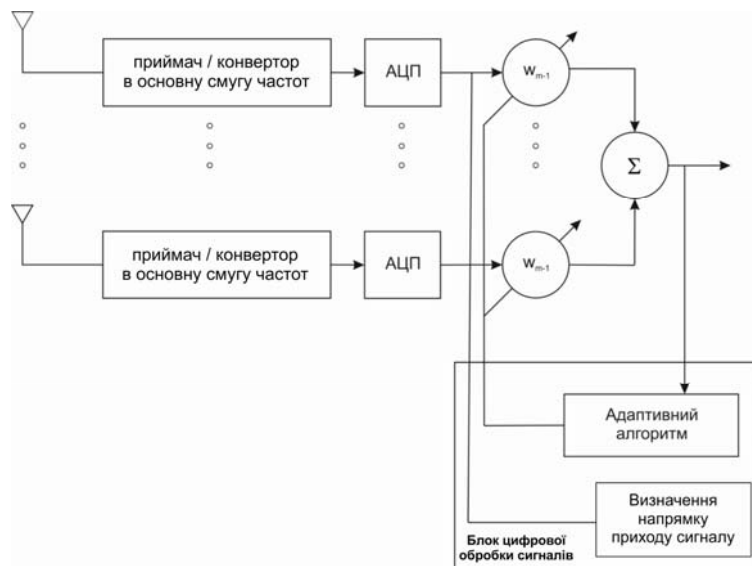


Рисунок 5 – Функціональна блок-схема адаптивної антенної решітки

Основними перевагами ААР є:

– збільшення пропускної здатності. У роботі [13] показано, що при використанні ААР, що складається з  $M$  елементів, можливе збільшення пропускної здатності до  $M$  разів;

– збільшення максимальної дальності зв'язку. ААР дозволяє збільшити максимальну дальність зв'язку до  $M-1$  разів, у порівнянні зі звичайною антенною решіткою, при однаковій кількості користувачів та підведеної потужності до антени [14];

– значне зменшення рівня завад. Лінійна антенна решітка з  $M$  елементів дозволяє створити  $M-1$  нулів діаграми спрямованості, та відповідно зменшити вплив  $M-1$  не корельованих завад.

В роботі використаний наступний алгоритм [15]:

$$R = [0, 1, 2, \dots, N - 1], \quad (4)$$

$$s_1 = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \left( \exp \left( \frac{i2\pi d}{\lambda} \sin(\theta_s) R \right) \right)^T; \quad (5)$$

$$s_2 = \frac{1}{n_n} \sum_{k=1}^{n_n} \left( \exp \left( \frac{i2\pi d}{\lambda} \sin(\theta_n) R \right) \right)^T;$$

$$w = s_1 - \frac{1}{N} s_2 s_2^T s_1; \quad (6)$$

$$\|w\| = \frac{w}{\sqrt{\text{sum}(\text{abs}(w)^2)}}. \quad (7)$$

Розрахунок вектора

$$s = \exp \left( \frac{i2\pi d}{\lambda} \sin(\theta) R^T \right). \quad (8)$$

Розрахунок та нормування коефіцієнта підсилення антени

$$G = \left( \text{abs} \left( \|w\|^T \cdot s \right) \right)^2; \quad (9)$$

$$G_{norm} = \frac{G}{G_{max}}; \quad (10)$$

$$G_{norm}, \text{dB} = 10 \log G_{norm}. \quad (11)$$

У даному випадку, у якості елемента антенної решітки використовується ізотропний (всепрямований) випромінювач та не враховується взаємний вплив елементів один на одного.

Для аналізу пропускної здатності мережі LTE-Advanced в середовищі Matlab була розроблена комп'ютерна модель мережі рухомого зв'язку (рис. 4), у якій випадковим чином розміщуються корисний та завадові сигнали. У якості антени базової станції використовувалися як стандартна антенна мереж 4G та адаптивна лінійна еквідистантна антенна решітка.

Вихідні дані мережі, на базі яких проводилося моделювання представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Вихідні дані моделі

Параметр	Значення
Частотний діапазон	1710–1785 МГц, 1805–1880 МГц (FDD, Band 3)
Радіус комірки	1 км
Висота підвісу антени БС	40 м
Висота підвісу антени АС	2 м
Смуга частот	10 МГц (50 ресурсних блоків)
Потужність передавача АС	–40 дБм...23 дБм
Максимальний коефіцієнт підсилення антени	16 дБі
Модель каналу	Extended Hata (Хата розширена)
Середовище	Міська забудова

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ

За результатами моделювання отримано значення діаграми спрямованості антени, що забезпечує мінімальний рівень коефіцієнта підсилення у напрямку заводових абонентських станцій, що мають найбільшу потужність, шляхом динамічної адаптації параметрів антени до розташування абонентських станцій та умов поширення сигналу.

При проведенні моделювання було виконано 100 випадкових розміщень (ітерацій) абонентів корисного та заводових сигналів [15].

В табл. 3 приведені усереднені значення мінімального, максимального та середнього виграшу при використанні адаптивної еквідистантної лінійної антенної решітки у порівнянні з стандартною антенною решіткою мережі рухомого зв'язку, параметри якої наведені в Рекомендації ITU-R F.1336-4 [10].

Таблиця 3 – Середній вигреш

$\theta$	$\Delta G_{\min}$ , дБ	$\Delta G_{\max}$ , дБ	$\Delta \bar{G}$ , дБ
$\theta_s$	2,95	8,56	5,69
$\theta_{n1}$	12,23	-49,99	-13,48
$\theta_{n2}$	22,52	-29,72	-2,06
$\theta_{n3}$	25,40	-25,21	1,69
$\theta_{n4}$	0,57	-62,01	-22,42
$\theta_{n5}$	0,30	-64,76	-32,84
$\theta_{n6}$	3,52	-54,33	-28,33

Аналіз таблиці 3 показує, що у середньому значення коефіцієнта підсилення адаптивної антенної решітки в напрямку абонентської станції, що створює корисний сигнал, більше на 5,69 дБ порівняно з стандартною антенною решіткою мережі LTE-A. У той же час є суттєве зменшення коефіцієнта підсилення антени у напрямку заводових абонентських станцій.

Значення  $\Delta \bar{G}$  значно залежить від кутової різниці між напрямками корисного та заводового сигналу. У напрямках заводових сигналів значення виграшу  $\Delta \bar{G}$  значно змінюється. Даний факт обумовлено відносно близьким розташуванням корисного сигналу та завади і неможливістю їх просторового розділення запропонованої адаптивної антенної решітки.

Для кількісної оцінки виграшу у якісних характеристиках мережі було проведено аналіз пропускної здатності LTE-A для різних типів антен для трьох типів каналів багатопроменевого поширення (EPA, ETU, EVA).

На рис. 6 зображено розподіл пропускної здатності (TBS, кбіт/с) для 50 RB при використанні стандартної антенної решітки при порівнянні з адаптивною еквідистантною лінійною антенною решіткою (рис. 7).

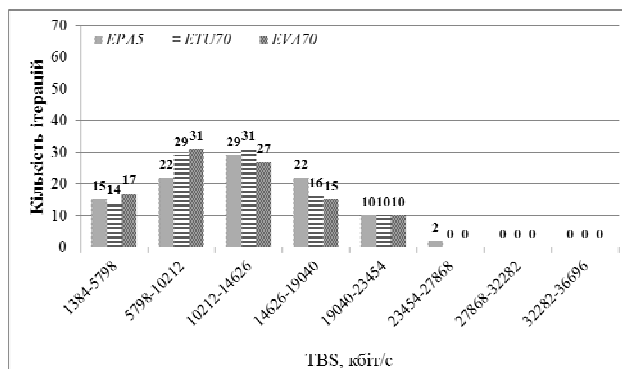


Рисунок 6 – Розмір транспортного блоку при використанні антенною решіткою, параметри якої наведено в Рекомендації ITU-R F.1336-4

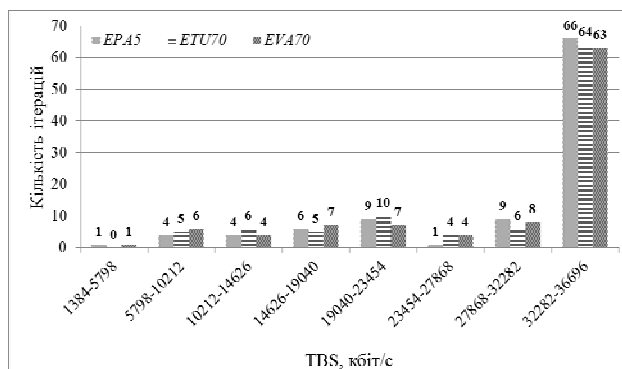


Рисунок 7 – Розмір транспортного блоку при використанні адаптивної лінійної еквідистантної антени

Як видно з рис. 6–7, пропускна здатність в мережі LTE-A суттєво збільшується при використанні запропонованої адаптивної антенної системи.

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

В умовах наявності внутрішньосистемних заводів при використанні стандартних антен базових станцій середня пропускна здатність становить від 11,2 Мбіт/с до 12,3 Мбіт/с. При використанні адаптивних антенних систем забезпечується вигреш підсилення антени в напрямку корисного сигналу та одночасне зменшення підсилення в напрямку заводових сигналів. Це забезпечується за рахунок адаптивної зміни параметрів антени шляхом пошуку абонентських станцій, що створюють найбільший рівень завади. Так для сигналів завади, що мають найбільший рівень (напрямки  $\theta_{n5}$ ,  $\theta_{n6}$ ) середній вигреш коефіцієнта підсилення антени становить 32,84 та 28,33 дБ відповідно. Однак в деяких випадках спостерігалось підвищення рівня заводових сигналів через появу дифракційних максимумів картини випромінювання запропонованої лінійної антенної решітки.

Коефіцієнт підсилення лінійної еквідистантної антенної решітки залежить від кількості її елементів та відстані між ними. Зі збільшенням кількості елементів збільшується роздільна здатність решітки, тобто здатність відокремлювати сигнал і перешкоди, що надходять від мінімально різних напрямків. Подальша оп-

тимізації характеристики спрямованості антени потребує збільшення кількості елементів решітки, що призводить до значного збільшення масо-габаритних розмірів всієї системи. Тому одне із подальших завдань – визначити оптимальне значення кількості елементів із потрібним значенням підсилення.

Проведене моделювання пропускної здатності на лінії вгору для 50 ресурсних блоків в мережі LTE-A. Вихідні дані для моделювання наведені в табл. 2. Такі параметри мережі можна вважати типовими для побудови мережі LTE-A в умовах міського середовища. Показано, що завдяки використанню адаптивних антенних систем, середня пропускна здатність збільшується з 11 Мбіт/с до 35 Мбіт/с для усіх типів каналів поширення, що розглядалися: EPA5, ETU70 та EVA70.

### ВИСНОВКИ

Наукова новизна отриманих результатів складається у тому, що для мережі рухомого зв'язку LTE-A на висхідній лінії можливо зменшити внутрішньосистемні завади, що створюються абонентськими станціями в сусідніх чарунках, за рахунок запропонованих адаптивних антенних решіток. Адаптивні антенні решітки дозволяють враховувати змінні умови в радіоканалі та поточну заводову обстановку. Діаграма спрямованості антени забезпечує просторову вибірковість, а саме мінімальний рівень у напрямку заводових абонентських станцій, що мають найбільшу потужність, шляхом динамічної адаптації параметрів антени до розташування абонентських станцій та умов поширення сигналу.

Практична значимість роботи складається у тому, що для оцінки збільшення пропускної здатності при застосуванні запропонованої антени в середовищі Matlab була розроблена комп'ютерна модель мережі рухомого зв'язку LTE-A. При проведенні моделювання було виконано 100 випадкових розміщень (ітерацій) абонентів корисного та заводових сигналів. У середньому значення коефіцієнта підсилення адаптивної антенної решітки в напрямку абонентської станції, що створює корисний сигнал більше на 5,69 дБ порівняно з стандартною антенною решіткою мережі LTE-A. У той же час є суттєве зменшення коефіцієнта підсилення антени у напрямку заводових абонентських станцій, а саме, для тих, що мають найбільший рівень завади виграш становить 32,84 дБ та 28,33 дБ відповідно.

При моделюванні пропускної здатності враховано, що залежно від якості в каналу зв'язку LTE-A відбувається адаптивна зміна модуляційно-кодової схеми при відомих значеннях коефіцієнта BLER знаходяться в індикаторах якості каналу CQI.

Моделювання пропускної здатності для 50 ресурсних блоків показало, що в умовах наявності внутрішньосистемних завод при використанні стандартних антен базових станцій середня пропускна здатність становить від 11,2 Мбіт/с до 12,3 Мбіт/с. У той же час завдяки використанню адаптивних антенних систем середня пропускна здатність збільшується з 11 Мбіт/с

до 35 Мбіт/с для усіх типів каналів багатопробенево-го поширення, що розглядалися.

Перспективи подальших досліджень використання адаптивних антенних масивів включають: врахування фактичних характеристик спрямованості елементів антенного масиву з урахуванням їх взаємного впливу, а також розробку нових антенних елементів з широкосмуговими властивостями. Також планується проаналізувати використання адаптивних антенних масивів більш складних конфігурацій з можливістю зменшення бічних максимумів схеми випромінювання, що суттєво збільшить результуюче співвідношення сигнал / (завада + шум).

### ПОДЯКИ

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Новітня концепція управління та передавання інформації із застосуванням адаптивних технологій в каналах відеозв'язку військово-цивільного призначення» на замовлення Міністерства освіти і науки України, реєстраційний номер 0117U006808

### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Ravindra S. Throughput Enhancement for Device to Device Communication in LTE-A Networks / S. Ravindra, G. K. Siddesh // International Journal of Engineering Technology Science and Research IJETSRS. – 2018. – Vol. 5, № 3. – P. 813 – 818. DOI: 10.1007/978-981-32-9690-9\_59
2. Kim I. Implementation and performance evaluation of 256-QAM in vienna system level simulator / I. Kim, J. Um and S. Park // 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Chuncheon-si Gangwon-do, Korea (South), 2018. – IEEE, 2018. – P. 556–559. DOI: 10.23919/ICACT.2018.8323830
3. Patent 2908002, USA. Electromagnetic reflector / L. C. Van; applicant. – № US514040A; appdate 08.06.1955; pubdate 06.10.1959
4. Wang Y. Intelligent resource optimisation using semi-smart antennas in LTE OFDMA systems / Y. Wang, X. Yang, A. Ma // IEEE International Conference on Communications Technology and Applications, Beijing, 2009. – IEEE, 2009. – P. 173–179. DOI: 10.1109/ICCOMTA.2009.5349214
5. Interference coordination and cancellation for 4G network / [G. Boudreau, J. Panicker, N. Guo et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol. 47, № 4. – P. 74–81. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4907410
6. Interference management for 4G cellular standards [WIMAX/LTE UPDATE] / [N. Himayat, S. Talwar, A. Rao et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2010. – Vol. 48, № 8. – P. 86–92. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5534591
7. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 12): 3GPP TS 36.101 V12.24.0. – [Effective from 2020-07-16]. – Valbonne: 3GPP, 2020. – 784 p.
8. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios: 3GPP TR 36.942 15.0.0. – [Effective from 2018-07-02]. – Sophia Antipolis: ETSI, 2018. – 110 p.
9. Yang W.-B. LTE physical layer performance analysis [Electronic resource]. – Access mode: <https://bit.ly/3g0A2ta>

10. Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile service for use in sharing studies in the frequency range from 400 MHz to about 70 GHz: ITU-R F. 1336-5 – [Effective from 2019-01-01]. – Geneva: ITU-R, 2019. – 110 p.
11. New spectrally efficient techniques and systems: ITU-R SM.856-1 – [Effective from 1997-03-01]. – Geneva : ITU-R, 1997. – 4 p.
12. Balanis C. Introduction to smart antennas Synthesis Lectures on Antennas / C. Balanis, P. Ioannides // Morgan & Claypool. – 2007. – 170 p. DOI: 10.2200/S00079ED1V01Y200612ANT005
13. Kim K. Handbook of CDMA system design, engineering and optimization / K. Kim. – New York : Prentice Hall, 2000. – 252 p.
14. Bressler Y. On the number of signals resolvable by a uniform linear array / Y. Bressler and A. Macovsky // Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1986. – Vol. 34, No. 6. – P. 1361–1375. DOI: 10.1109/TASSP.1986.1164973
15. Makoveenko D. Use of Adaptive Antenna Arrays to Reduce Interference in the E-UTRA Network / D. Makoveenko, S. Siden, V. Pyliavskiy // 27th National Conference with International Participation (TELECOM), 2019. – IEEE, 2019. – P. 12–15. DOI: 10.1109/TELECOM48729.2019.8994885

Стаття надійшла до редакції 12.05.2021.  
Після доробки 19.08.2021.

УДК 621.396

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ LTE-A

**Маковецько Д. А.** – канд. техн. наук, доц. каф. телевидення і радіовещання, Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Украина.

**Сідень С. В.** – канд. техн. наук, ст. викл. каф. телевидення і радіовещання, научно-исследовательского центра телекоммуникационных систем и сетей связи, Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Украина.

**Пілявський В. В.** – канд. техн. наук, ст. викл. каф. телевидення і радіовещання, Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Украина.

#### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Сделаны предложения о возможности использования адаптивных антенных решеток для увеличения пропускной способности в сетях мобильной связи LTE-A и проанализированы выигрыш от ее использования по сравнению со стандартным типом антенны базовых станций.

**Цель.** Целью статьи является анализ пропускной способности сети мобильной связи LTE-A на восходящей линии при использовании адаптивной линейной эквидистантной антенной решетки.

**Метод.** Для достижения результата была разработана компьютерная модель анализа помеховой обстановки сети мобильной связи в виде плоской регулярной гексагональной антенной решетки, которая состоит из 7 трех секторных ячеек. Для оценки выигрыша от использования адаптивных антенных решеток были проанализированы два варианта: при использовании стандартной антенной решетки сети LTE-A, и адаптивной линейной эквидистантной антенной решетки. При проведении моделирования было выполнено 100 случайных размещений абонентов полезного и помеховых сигналов и рассчитан минимальный, максимальный и средний выигрыш от использования адаптивных антенных решеток. В среднем значение коэффициента усиления для адаптивной антенной решетки в направлении абонентской станции создает полезный сигнал больше на 5,69 дБ по сравнению со стандартной антенной решеткой сети LTE-A. В то же время есть существенное уменьшение коэффициента усиления адаптивной антенны в направлении помеховых абонентских станций, а именно, для имеющих наибольший уровень помехи выигрыш составляет 32,84 дБ и 28,33 дБ соответственно. Для наглядного показа выигрыша в качественных характеристиках сети был проведен анализ пропускной способности для различных типов антенн. Представлено распределение пропускной способности (размер транспортного блока) для 50 ресурсных блоков при использовании адаптивной эквидистантной линейной антенной решетки по сравнению со стандартной антенной решеткой.

**Результаты.** Показано, что благодаря использованию адаптивных антенных систем средняя пропускная способность увеличивается с 11 Мбит / с до 35 Мбит / с для всех типов каналов распространения, которые рассматривались.

**Выводы.** В статье предложено использование адаптивных антенных решеток для увеличения пропускной способности сети LTE-A. Моделирование пропускной способности для 50 ресурсных блоков показало, что в условиях наличия внутри-системных помех при использовании стандартных антенн базовых станций средняя пропускная способность составляет от 11,2 Мбит / с до 12,3 Мбит / с. В то же время благодаря использованию адаптивных антенных систем средняя пропускная способность увеличивается с 11 Мбит / с до 35 Мбит / с для всех типов каналов многолучевого распространения, которые рассматривались.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** адаптивная модуляция и кодирование, пропускная способность, адаптивная антенна, транспортный блок, помеха.

UDC 621.396

### USE OF ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS FOR INCREASE THE THROUGHPUT IN LTE-A

**Makoveenko D. O.** – PhD, Associate Professor, Department of Television and Radio Broadcasting, State University of Intelligent Technologies and Telecommunications, Ukraine.

**Siden S. V.** – PhD, Senior Lecturer, Department of Television and Radio Broadcasting, State University of Intelligent Technologies and Telecommunications, Ukraine.



**Pyliavskiy V. V.** – PhD, Senior Lecturer, Department of Television and Radio Broadcasting, State University of Intelligent Technologies and Telecommunications, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** The aim of the article is to analyze the throughput of the LTE-A mobile network on the uplink using an adaptive linear equidistant antenna array.

**Objective.** Suggestions have been made for the possibility of using adaptive antenna arrays to increase bandwidth in LTE-A mobile networks and analyze the benefits of its use compared to the standard type of base station antenna

**Method.** To achieve this result, a computer model of noise analysis of the mobile network in the form of a flat regular hexagonal antenna array consisting of 7 three-sector cells was developed. To estimate the benefit from the use of adaptive antenna arrays, two options were analyzed: when using a standard antenna array of the LTE-A network, and an adaptive linear equidistant antenna array. During the simulation, 100 random placements of subscribers of useful and interference signals were performed and the minimum, maximum and average gain from the use of adaptive antenna arrays was calculated. The average value of the gain for the adaptive antenna array in the direction of the subscriber station, which generates a useful signal of 5.69 dB more than the standard antenna array of the LTE-A network. At the same time, there is a significant reduction in the gain of the adaptive antenna in the direction of the interference subscriber stations, namely, for those with the highest interference level, the gain is 32.84 dB and 28.33 dB, respectively. To clearly show the gain in the qualitative characteristics of the network, a bandwidth analysis was performed for different types of antennas. The bandwidth distribution (transport block size) for 50 resource blocks using an adaptive equidistant linear antenna array compared to a standard antenna array is presented.

**Results.** It is shown that due to the use of adaptive antenna systems, the average bandwidth increases from 11 Mbit/s to 35 Mbit/s for all types of distribution considered channels.

**Conclusions.** The article proposes the use of adaptive antenna arrays to increase the bandwidth of the LTE-A network. The simulation of bandwidth for 50 resource blocks showed that in the presence of internal system interference when using standard antennas of base stations, the average bandwidth is from 11.2 Mbps to 12.3 Mbps. At the same time, due to the use of adaptive antenna systems, the average bandwidth increases from 11 Mbit/s to 35 Mbit/s for all types of multipath channels considered.

**KEYWORDS:** adaptive modulation and coding, capacity, adaptive antenna, transport block, interference.

#### REFERENCES

1. Ravindra S., Siddesh G. K. Throughput Enhancement for Device to Device Communication in LTE-A Networks, *International Journal of Engineering Technology Science and Research IJETS*, 2018, Vol. 5, No. 3, pp. 813–818. DOI: 10.1007/978-981-32-9690-9\_59
2. Kim I., Um J. and Park S. Implementation and performance evaluation of 256-QAM in vienna system level simulator, *20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Chuncheon-si Gangwon-do, Korea (South), 2018*, IEEE, 2018, pp. 556–559. DOI: 10.23919/ICACT.2018.8323830
3. Van L. C. Patent 2908002, USA. Electromagnetic reflector ; applicant, № US514040A; appdate 08.06.1955; pubdate 06.10.1959
4. Wang Y., Yang X., Ma A. Intelligent resource optimisation using semi-smart antennas in LTE OFDMA systems, *IEEE International Conference on Communications Technology and Applications*. Beijing, 2009, IEEE, 2009, pp. 173–179. DOI: 10.1109/ICCOMTA.2009.5349214
5. Boudreau G., Panicker J., Guo N. et al. Interference coordination and cancellation for 4G network, *IEEE Communications Magazine*, 2009, Vol. 47, No. 4, pp. 74–81. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4907410
6. Himayat N., Talwar S., Rao A. et al. Interference management for 4G cellular standards [WIMAX/LTE UPDATE], *IEEE Communications Magazine*, 2010, Vol. 48, No. 8, pp. 86–92. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5534591
7. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 12): 3GPP TS 36.101 V12.24.0. [Effective from 2020-07-16]. Valbonne, 3GPP, 2020, 784 p.
8. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios: 3GPP TR 36.942 15.0.0. [Effective from 2018-07-02]. Sophia Antipolis, ETSI, 2018, 110 p.
9. Yang W.-B. LTE physical layer performance analysis [Electronic resource]. Access mode: <https://bit.ly/3g0A2ta>
10. Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile service for use in sharing studies in the frequency range from 400 MHz to about 70 GHz: ITU-R F. 1336-5. [Effective from 2019-01-01]. Geneva, ITU-R, 2019, 110 p.
11. New spectrally efficient techniques and systems: ITU-R SM.856-1. [Effective from 1997-03-01]. Geneva, ITU-R, 1997, 4 p.
12. Balanis C., Ioannides P. Introduction to smart antennas Synthesis Lectures on Antennas, *Morgan & Claypool*, 2007, 170 p. DOI: 10.2200/S00079ED1 V01Y200612ANT005
13. Kim K. Handbook of CDMA system design, engineering and optimization. New York, Prentice Hall, 2000, 252 p.
14. Bressler Y. and Macovsky A. On the number of signals resolvable by a uniform linear array, *Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986, Vol. 34, No. 6, pp. 1361–1375. DOI: 10.1109/TASSP.1986.1164973
15. Makoveenko D., Siden S., Pyliavskiy V. Use of Adaptive Antenna Arrays to Reduce Interference in the E-UTRA Network, *27th National Conference with International Participation (TELECOM), 2019, IEEE*, 2019, pp. 12–15. DOI: 10.1109/TELECOM 48729.2019.8994885