

УДК 621.391

д-р філософії Фомін М. М. ORCID: 0000-0002-6864-4238 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ NOMA НА ОСНОВІ РЕТРАНСЛЯЦІЇ І МОДУЛЯЦІЇ

Для успішного впровадження мереж мобільного зв'язку у спектральному діапазоні 30–300 ГГц необхідно вирішити кілька проблем, пов'язаних із кінцевими абонентськими пристроями. І однією з головних проблем є блокування невеликих об'єктів передачі прямої видимості. Шляхами вирішення цієї задачі є ущільнення стільникової інфраструктури терагерцового діапазону за допомогою рухомих вузлів мобільного зв'язку, а також застосування одночасного підключення абонентських терміналів до двох і більше стільників одночасно [1; 2].

У цій роботі пропонується для рішення такої задачі удосконалений алгоритм NOMA на основі ретрансляції і модуляції під назвою M-CO-NOMA. На відміну від відомих він відрізняється тим, що, по-перше, перед випромінюванням у радіоефір у першому часовому слоті проводиться кластеризація термінальних пристроїв у зоні обслуговування базової станції мобільної мережі із застосуванням алгоритму оцінки фрактальної розмірності і, по-друге, при формуванні загального транспортного сигналу для термінальних пристроїв абонентів базова станція модулює сигнали віддалених користувачів на квадратурну, а сигнали ближніх користувачів на реальній складовій сузір'я QPSK.

Запропонований удосконалений алгоритм M-CO-NOMA забезпечує усунення основних завад NOMA, звівши ортогональність на стадії підготовки сигналу замість включення її в спектр. Показано, що запропонований удосконалений алгоритм ефективний за такими показниками, як зниження SER, обчислювальної складності, завад порівняно зі звичайним NOMA.

Крім того, інтегроване рішення на базі M-NOMA та CO-NOMA дозволило отримати нові інноваційні можливості по забезпеченню передачі даних при блокуванні прямої передачі в терагерцовому діапазоні частот завдяки допоміжній ретрансляції сигналів між абонентами. Розрахунок інформаційної ефективності розробленого інтегрованого рішення показав, що для систем з NOMA та M-CO-NOMA цей показник дорівнює відповідно  $4,50e^{-2}$  та  $6,00e^{-2}$ . Отже, розраховане значення інформаційної ефективності системи M-CO-NOMA в 1,5 рази більше, ніж у NOMA.

**Ключові слова:** терагерцовий діапазон, блокування передачі, модуляція, ретрансляція, інтегровані рішення.

### **M. Fomin. A model of the improved NOMA algorithm based on representation and modulation.**

For the successful implementation of mobile communication networks in the spectral range of 30-300 GHz, it is necessary to solve several problems related to terminal subscriber devices. And one of the main problems is to be blocked by small line-of-sight transmission objects. Ways to solve this problem are densification of cellular infrastructure in the terahertz range with the help of mobile mobile communication nodes, as well as the use of simultaneous connection of subscriber terminals to two or more cells at the same time [1; 2].

In this work, an improved NOMA algorithm based on relaying and modulation called M-CO-NOMA is proposed to solve this problem. Unlike the known ones, it differs in that, firstly, before broadcasting into the radio air in the first time slot, terminal devices are clustered in the service area of the base station of the mobile network using the algorithm for estimating the fractal dimension and, secondly, during the formation of the general transport signal for terminal devices of subscribers, the base station modulates the signals of remote users on the quadrature, and the signals of nearby users on the real component of the QPSK constellation.

The proposed improved M-CO-NOMA algorithm eliminates the main drawbacks of NOMA by introducing orthogonality at the stage of signal preparation instead of including it in the spectrum. It is shown that the proposed improved algorithm is effective in terms of such indicators as the reduction of SER, computational complexity, and interference compared to the usual NOMA.

In addition, the integrated solution based on M-NOMA and CO-NOMA made it possible to obtain new innovative opportunities for ensuring data transmission when blocking direct transmission in the terahertz frequency range due to auxiliary signal relaying between subscribers. Calculation of the information efficiency of the developed integrated solution showed that for systems with NOMA and M-CO-NOMA, this indicator is equal to  $4.50e^{-2}$  and  $6.00e^{-2}$ , respectively. Thus, the calculated information efficiency value of the M-CO-NOMA system is 1.5 times greater than that of NOMA.

**Keywords:** terahertz range, transmission blocking, modulation, retransmission, integrated solutions.

### **Постановка завдання у загальному вигляді**

Для успішного впровадження мереж мобільного зв'язку у спектральному діапазоні 30–300 ГГц необхідно вирішити кілька проблем, пов'язаних із кінцевими абонентськими пристроями [3]. Поточні термінали мобільного зв'язку підтримують різні радіоінтерфейси на різних частотних діапазонах, здатні функціонувати від 800 МГц до 2,7 ГГц. Проте для використання вищих частотних діапазонів потрібне значне вдосконалення апаратної частини терміналів, а також оптимізація антенних систем кінцевих пристроїв для ефективної роботи в будь-якому діапазоні від 800 МГц до 300 ГГц.

Дослідження в області терагерцового діапазону показали, що передача на високих частотах може блокуватися невеликими об'єктами через коротші довжини хвиль [4]. Це призводить до падіння потужності на приймальній стороні і робить з'єднання менш надійними. Однак можливе збільшення надійності з'єднання завдяки ущільненню стільникової інфраструктури терагерцового діапазону за допомогою рухомих вузлів мобільного зв'язку, а також застосуванню одночасного підключення абонентських терміналів до двох і більше стільників одночасно.

Важливо зауважити, що блокування з'єднання в терагерцовому діапазоні є випадковою подією, яка потребує негайної реакції системи зв'язку, щоб уникнути перерви в активній сесії. Тому потрібно керувати одночасним підключенням абонентських терміналів до двох і більше з'єднань у терагерцовому діапазоні для оперативного перенаправлення сесії на іншу точку доступу у разі блокування поточного з'єднання. Такий підхід є новим функціоналом мережі доступу, що відрізняється від існуючих підходів щодо розподілу абонентського трафіку на інші технології радіодоступу.

З цієї точки зору представляє великий інтерес використання нової технології NOMA для забезпечення рішення такої задачі [5; 6]. У існуючих технологіях, таких як OFDMA, сигнали користувачів поділяються з використанням частоти або часу, або того й іншого. Технології NOMA є особливо привабливими внаслідок високої спектральної ефективності, яка може бути досягнута шляхом усунення ортогональності, яка використовується існуючими технологіями для поділу доступного спектра з метою запобігання завадам. Однак повне усунення ортогональності також викликає завади, які можуть бути видалені з використанням алгоритмів SIC, що виконуються на приймачі NOMA. Кількість процедур SIC збільшує обчислювальну складність звичайної системи NOMA.

Неортогональний множинний доступ (NOMA) є однією з інновацій, здатних у перспективі забезпечити бездротовий зв'язок 5-го і наступного поколінь (5G і B5G). Для забезпечення системи зв'язку в існуючих системах використовується поділ доступного природного спектра, що на сьогодні призвело до вичерпання більшої частини спектра. NOMA не потрібно розділяти спектр для надання зв'язку користувачам та виконання інших системних вимог, він може ефективно використовувати вихід спектра для виконання всіх сучасних вимог зв'язку поряд з Інтернетом речей (IoT), BigData та тактильним Інтернетом. Ця ефективна система використовує безліч різних механізмів подолання розриву у розділенні спектра, що дозволяє надавати послуги зв'язку вищої якості. Використання NOMA забезпечує кращу секретність та конфіденційність, високу швидкість передачі даних, пропускну здатність, енергоефективність, спектральну ефективність, рівну доступність зв'язку для користувачів (системну справедливість), знижує ймовірність простою, затримку, кількість помилок на біт (BER) тощо, може бути інтегрований з будь-яким з існуючих алгоритмів системи виходу. Поряд з ефективною стороною NOMA стикається з певними обмеженнями, які вимагають уваги, в першу чергу з великим числом завад. Це призводить до певних недоліків, включаючи складність системи, проблеми із забезпеченням безпеки та конфіденційності. Перед передачею NOMA поділяє сигнали користувачів за частотою і часом, використовуючи FDMA (Frequency Division Multiple Access – множинний доступ із поділом

каналів за частотою) та TDMA (Time Division Multiple Access – багаторазовий доступ із тимчасовим поділом). Щоб диференціювати користувачів, NOMA виділяє різну кількість потужності для різних користувачів, що підвищує рівень завад та проблеми безпеки між сигналами (рис. 1).

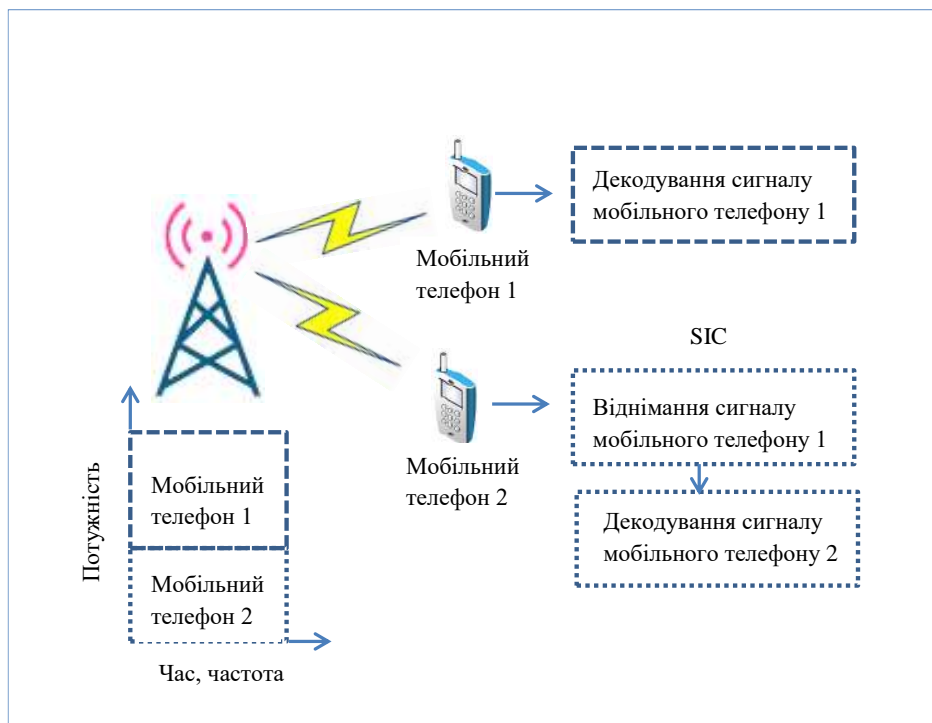


Рис. 1. Процес функціонування з технологією NOMA

Кожен користувач отримує комбінований сигнал повідомлення з завадами від усіх інших користувачів. Отже, кожен користувач повинен виконати SIC (Successive Interference Cancellation – послідовне придушення завад) для сигналів усіх інших користувачів. Більша кількість завад з боку користувачів збільшує обчислювальну складність SIC зі збільшенням кількості сигналів, що заважають. Дослідження NOMA для системи бездротового зв'язку нового покоління продовжуються.

#### Аналіз публікацій за темою досліджень

Для задоволення високих технологічних вимог NOMA пропонується як претендент на майбутню технологію 6G [7]. Він може забезпечити ряд переваг, включаючи надзвичайно високу швидкість, кращу спектральну ефективність, меншу затримку, чудову швидкість ергодичної суми та множинного доступу і т. ін. потужності. Виділення як субпередачі користувачів із гіршими умовами каналу істотно впливає на спектральну ефективність системи в OMA. Використання NOMA в 5G може подолати цей недолік завдяки більш ефективному використанню спектра всіма користувачами разом із використанням різних або звичайних стратегій розподілу енергії [8; 9]. В методі множинного ортогонального доступу (OMA) у певних випадках обслуговувалися лише користувачі зі стандартними умовами каналу, тоді як у NOMA всі користувачі є рівнозначними, що забезпечує рівноцінне обслуговування поряд із високою зв'язністю та низькою затримкою [10]. Методи підвищення спектральної ефективності MIMO-NOMA та зв'язку між когнітивним радіо та NOMA обговорюються в [10]. Переваги NOMA порівняно з OMA (включаючи OFDMA) з використанням результатів моделювання продемонстровано в [11]. Компроміс між пропускну здатністю та енергоефективністю для енергетичної області OMA та кілька проблем для NOMA відображено у [12].

Інші нові ідеї в областях, пов'язаних з NOMA, охоплюють такі питання, як спільне NOMA, що використовує кодування розподілених просторово-часових блоків [13], вплив хаотично розподілених користувачів на NOMA [20], нові методи спільного використання спектра для 5G з використанням NOMA [14; 19], дослідження продуктивності збоїв [15] та NOMA на основі просторової модуляції [16–18]. Віртуальне сполучення користувачів OMA з прикордонних зон зв'язку з центральними користувачами NOMA під назвою VP-NOMA [21] надало можливість зв'язати одного центрального користувача з кількома користувачами прикордонних зон OMA. Для VP-NOMA користувачів периферійних осередків має бути більше, ніж центральних користувачів. Результат моделювання довів, що VP-NOMA працює краще ніж NOMA і OMA.

#### **Постановка завдання**

Метою цієї статті є розробка алгоритму підвищення ефективності NOMA з урахуванням завад між сигналами користувача, обчислювальної складності SIC та надійності функціонування децентралізованих мереж мобільного зв'язку 5G при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні частот.

#### **Виклад основного матеріалу**

##### **Загальний принцип функціонування запропонованого алгоритму NOMA**

Удосконалений алгоритм NOMA низхідного каналу зв'язку на основі ретрансляції та модуляції (M-CO-NOMA) для двох груп абонентів має покрокову наступну послідовність:

Крок 1. На базовій станції мобільної мережі відбувається формування загального транспортного (групового) сигналу NOMA для термінальних пристроїв абонентів.

Крок 2. Після чого сигнал випромінюється в радіоефір у першому часовому слоті, який приймається термінальним пристроєм першого абоненту.

Крок 3. Здійснюється демодуляція та компенсація сигналу для термінального пристрою другого абонента з подальшою демодуляцією власного сигналу за допомогою алгоритму SIC демодуляції, при цьому регенерований сигнал для термінального пристрою другого абонента зберігається у пам'яті до моменту ретрансляції.

Крок 4. Далі протягом другого тимчасового слота відбувається передача сигналу від першого до другого термінального пристрою абонента.

Крок 5. Після прийому сигналу, що ретранслює, на стороні другого абонента відбувається гнучка демодуляція двох прийнятих сигналів.

Удосконалений алгоритм на основі ретрансляції та модуляції відрізняється від відомих [8–18] тим, що для підвищення ефективності функціонування алгоритму NOMA у ньому застосовуються наступні допоміжні технологічні операції:

– перед випромінюванням у радіоефір у першому часовому слоті проводиться кластеризація термінальних пристроїв у зоні обслуговування базової станції мобільної мережі із застосуванням алгоритму оцінки фрактальної розмірності;

– при формуванні загального транспортного сигналу для термінальних пристроїв абонентів базова станція модулює найближчих користувачів за допомогою дійсної компоненти комплексних символів сузір'я QPSK (чотирипозиційної фазової модуляції), а далеких – за допомогою уявної компоненти.

#### **1. Алгоритм кластеризації мобільних терміналів для реалізації удосконаленого алгоритму M-CO-NOMA**

Принцип запропонованого алгоритму, побудованого на основі методу аналізу фрактальної розмірності мережі [22], полягає у нарощуванні кластера та контролю приросту кількості вузлів (мобільних терміналів)  $Q$ . Зменшення приросту кількості вузлів до малої величини  $Q_0$  свідчить про виділення першого кластера. Усі зв'язкові вузли позначаються як

вузли першого кластера та виключаються з подальшого розгляду. Далі процес циклічно повторюється з випадкової позиції до моменту локалізації наступного кластера. Процес локалізації кластерів повторюється, доки всі вузли в заданій області не будуть приписані до своїх кластерів.

Алгоритм методу кластеризації наведено на рисунку 2.

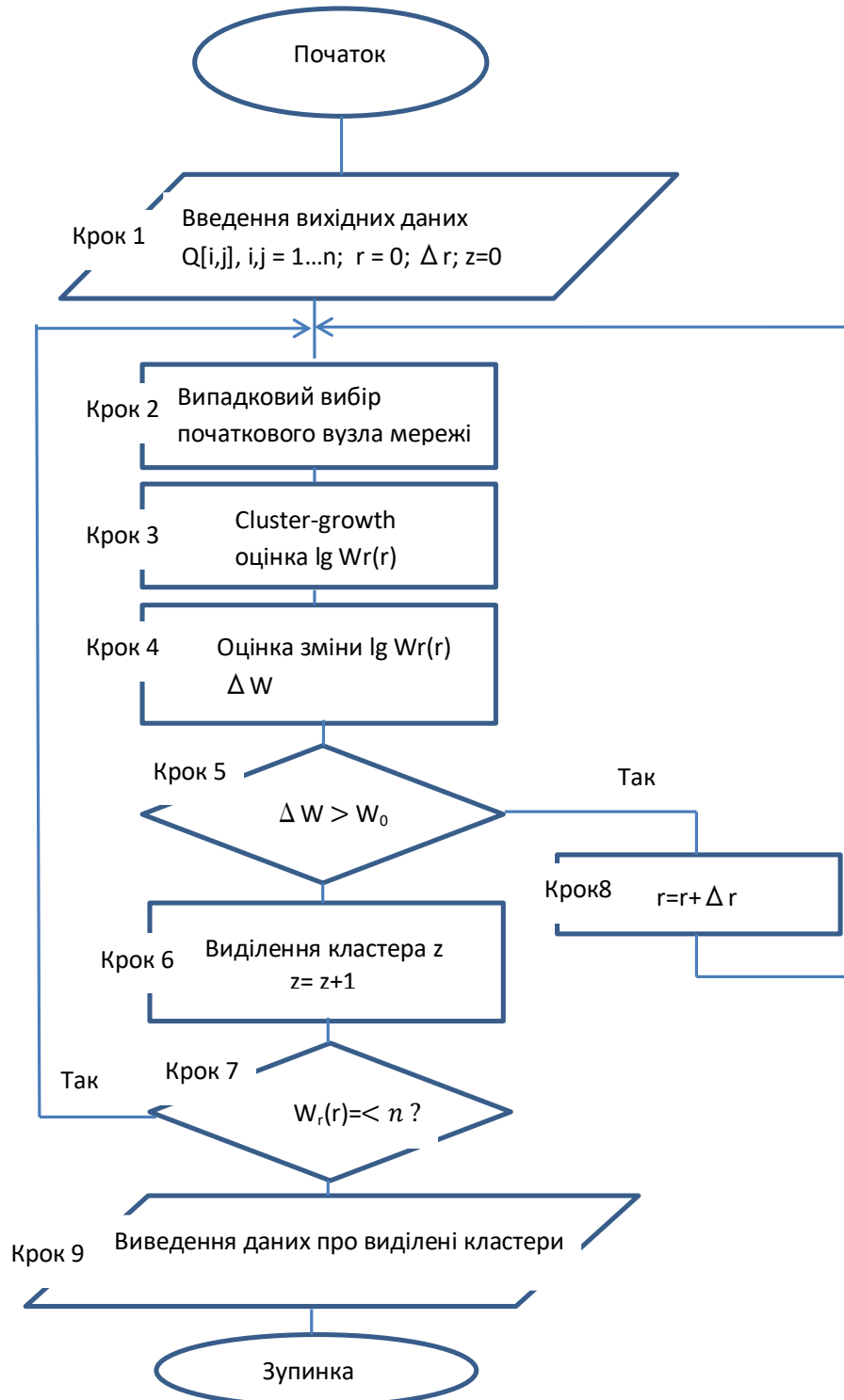


Рис. 2. Алгоритм методу кластеризації мережі

Мережа описана матрицею  $Q$  розміру  $n \times n$ :

$$Q = \begin{bmatrix} d_{11} & Z & d_{1n} \\ W & d_{ij} & W \\ d_{n1} & Z & d_{nn} \end{bmatrix}.$$

Елементи матриці  $d_{ij}$  є метрикою, що характеризує досяжність вузла  $j$  з вузла  $i$ . Як було зазначено вище, такою метрикою може бути відстань або інші метрики, отримані на основі рівня потужності сигналу або відношення сигнал/шум, згасання.

У запропонованому алгоритмі  $d_{ij}$  це рівень потужності сигналу, що може бути вимірний для реальної мережі, а у моделі обчислений з урахуванням моделі згасання і потужності передавача:

$$d_{ij} = p_j - \alpha_{ij},$$

де  $p_j$  – рівень потужності передавача  $j$ -го вузла (дБм),  $\alpha_{ij}$  – загасання сигналу між вузлами  $i$  та  $j$  (дБ).

Збір даних про основні параметри функціонування мережної інфраструктури здійснюється з використанням системи моніторингу. Ключовою відмінністю цього рішення від традиційних сучасних рішень, які використовуються операторами мобільного зв'язку, є те, що в основі процесу моніторингу є кінцеві термінали абонентів, які здійснюють збір даних про показники ефективності функціонування мережі. Таке рішення неможливо реалізувати існуючими засобами моніторингу, які передбачені у стандарті 5G, оскільки вони передбачають централізоване функціонування в межах домену одного оператора, що суттєво ускладнить процес узгодження результатів моніторингу між операторами для формування консенсусної бази даних.

Збирання даних про основні параметри роботи мережної інфраструктури відбувається за допомогою системи моніторингу. Головною відмінністю цього підходу від традиційних методів, що використовуються операторами мобільного зв'язку, є те, що в процесі моніторингу використовуються кінцеві термінали абонентів для збору даних про продуктивність мережі. Такий підхід не можна реалізувати за допомогою існуючих інструментів моніторингу, передбачених у стандарті 5G, оскільки вони передбачають централізоване управління в межах одного оператора, що ускладнює процес узгодження результатів моніторингу між операторами для створення єдиного джерела даних.

Вибір метрики віддзеркалюється на правилі формування кластера, що використовується методом Cluster-growth. Кластер формується, починаючи з випадкового стартового вузла, приєднанням нових вузлів, якщо значення метрики не менше  $r$ . Побудова кластера може бути реалізована пошуком углиб [23].

Розмір  $\Delta r$  є збільшенням, а  $r$  при побудові залежності розміру мережі від величини метрики підбирається емпірично.

Вихідними даними (крок 1) для даного алгоритму є дані про кількість вузлів мережі  $n$  матриці  $Q$ , що містить значення метрики, величина кроку зміни  $\Delta r$ , лічильник числа кластерів  $z$ .

Далі (крок 2) випадковим чином вибирається вузол, який використовується як стартовий для наступного кроку алгоритму.

На наступному етапі виконується побудова кластера з поточною величиною метрики  $r$ . Результатом є логарифм кількості вузлів у побудованому кластері, яке може набувати значень від 0 до  $\lg n$ .

На кроці 4 проводиться оцінка зміни кількості вузлів у кластері порівняно з попереднім циклом. Зміна є випадковою, а її величина залежить від  $\Delta r$  і розподілу метрики в матриці  $R$ , тому прийняття рішення на наступному кроці 5 про те, що приріст розміру мережі малий, робиться за декількома послідовними результатами.

На кроці 5 приймається рішення про виділення кластера або подальше продовження його локалізації. Кластер виділяється, якщо приріст розміру мережі не перевищує величини  $W_0$ , інакше значення метрики збільшується на величину  $r$  (крок 8) і процес повертається до кроку 2.

Якщо критерій виконується, то на кроці 6 проводиться виділення вузлів локалізованого кластера та виключення їх із подальшого розгляду. Кількість локалізованих кластерів  $z$  зростає на одиницю.

На наступному кроці проводиться перевірка кількості вузлів мережі, не віднесених до одного кластеру, якщо вона не нуль, то процес виділення кластерів повторюється, тобто провадиться перехід до кроку 2.

В іншому випадку процес кластеризації завершено, на кроці 9 проводиться висновок результатів кластеризації і зупиняється.

Порівняння запропонованого алгоритму з алгоритмами FOREL, k-середніх [24] за вимогами до вихідних даних наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

| Алгоритм              |                     |                 |                             |
|-----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
|                       | Кількість кластерів | Розмір кластера | Щільність вузлів у кластері |
| FOREL                 | -                   | +               | -                           |
| k-середніх            | +                   | -               | -                           |
| Пропонований алгоритм | -                   | -               | -                           |

З наведеної таблиці видно, що запропонований алгоритм вимагає найменшої кількості вихідних даних, що дозволяє його застосовувати у випадках із невідомою кількістю кластерів, їхніх розмірів і форми, а також за різної щільності вузлів у кластерах. Найбільш близьким із наведених алгоритмів можна вважати FOREL, проте для застосування в умовах різної щільності вузлів у кластерах потрібна його модифікація.

## 2. Особливості реалізації методів CO-NOMA та M-NOMA

### 2.1. Метод CO-NOMA

Як технологія ретрансляція сигналів на базі групи методів NOMA у зарубіжних джерелах називається Cooperative-NOMA (CO-NOMA). Метод CO-NOMA полягає у додатковій ретрансляції сигналу від одного абонента до іншого за умови, що канал зв'язку між абонентами є сприятливим. Процедура ретрансляції при цьому може здійснюватися у додатковий частотно-часовий ресурс, наприклад, у тимчасовий слот. Застосування ретрансляції з урахуванням NOMA найефективніше (на відміну OFDMA) оскільки груповий сигнал NOMA містить у собі інформацію про сигнали всіх абонентів, тому не потрібно виділення додаткового ресурсу передачі для того, що ретранслюється. Протягом першого тимчасового слота сигнал, сформований за технологією NOMA, передається від базової станції до абонентів MT1 та MT2. Протягом другого тимчасового слота сигнал ретранслюється від MT1 до MT2. На стороні абонента MT2 відбувається гнучка демодуляція двох прийнятих сигналів – сигналу від базової станції, прийнятого в перший часовий слот, і ретрансльованого сигналу від іншого абонента, прийнятого в другий часовий слот. Таким чином, відношення сигнал/шум на вході демодулятора повідомлення MT2 підвищується і досягається покращення якості зв'язку.

Технологія CO-NOMA запропонована зовсім недавно і являє інтерес для моделювання та експериментального дослідження. Особливо дуже актуальним питання є підвищення завадостійкості. Найбільш перспективними, з нашої точки зору, виглядають комбіновані методи, що використовують одночасно кілька ресурсних просторів для поділу користувачів і забезпечують багатовимірний доступ до радіоефіру. Такі методи множинного доступу повинні

бути динамічними та адаптивними, що дозволяють гнучко вибирати ті чи інші ресурсні простори залежно від кількості користувачів, що обслуговуються в конкретний момент, рівня завад, умов розповсюдження сигналу та інших факторів. Тому дослідження комплексного рішення із застосуванням методів множинного доступу CO-NOMA та методів з бітовим поділом NOMA на основі модуляції (modulation based NOMA, M-NOMA) є актуальною науково-технічною задачею.

## 2.2. Метод M-NOMA

У методі M-NOMA використовується модуляція для створення ортогональності між користувачами. Цей метод як спрощує систему, так і поліпшує її загальну продуктивність порівняно з існуючими методами NOMA. В M-NOMA базова станція поділяє ближніх та далеких користувачів за допомогою модуляції. Найближчі користувачі модулюються за допомогою дійсної компоненти комплексних символів сузір'я QPSK (чотирипозиційної фазової модуляції), а далекі – за допомогою уявної компоненти. Це забезпечує ортогональність, або кластеризацію між сигналами ближніх і віддалених користувачів. Кластеризація запобігає завадам між віддаленими та ближніми користувачами. В алгоритмі M-NOMA користувачі, розташовані ближче до базової станції, отримують сигнали повідомлення без завад, викликаних сигналами віддалених користувачів.

Метод M-NOMA дозволяє зменшити частоту символічних помилок, міжстільникові та міжкластерні завади, затримку та обчислювальну складність. Він має кращу продуктивність порівняно зі звичайним NOMA з погляду швидкості передачі даних і завад.

Для того щоб усунути розраховані на багато користувачів завади на приймачі, використовують метод послідовної компенсації завад (Successive Interference Cancellation, SIC). Крім того, SIC зменшує відношення «сигнал – завада плюс шум» (SINR) через природний ефект близької відстані або при зміні розподілу потужності між користувачами на передавачі.

При цьому ближнім та віддаленим користувачам необхідно виконувати операції SIC лише в межах одного кластера ближніх або віддалених користувачів. Для порівняння, ближні користувачі алгоритму M-NOMA виконують у  $N/2$  рази менше операцій SIC, ніж алгоритму NOMA, але віддалені користувачі виконують таку саму кількість операцій SIC.

## 3. Системна модель удосконаленого алгоритму M-CO-NOMA

Розглянемо сценарій системи мобільного зв'язку, у якому є один стільник з однією базовою станцією (БС) в центрі зони обслуговування і чотири користувачами. Для запропонованої схеми можемо мати  $N$  користувачів у зоні обслуговування БС. Однак для простоти ми розглядаємо 4 користувачів. Користувачі відокремлені від БС на відповідні відстані. Загальна кількість користувачів поділена на дві групи кластерів. Половина ( $N/2$ ) користувачів вважається ближніми, а половина, що залишилася, – віддаленими.

### 3.1. Принцип функціонування удосконаленого алгоритму M-CO-NOMA

Розглянемо спільну комунікацію у двох кластерах – ближньому та віддаленому. Кластер 1 – це кластер із кращим відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму SNR (Signal-to-Noise Ratio) щодо кластера 2.  $W_1$  – мобільний телефон найближчого користувача у кластері 1, а  $W_3$  – мобільний телефон найближчого користувача у кластері 2 відносно БС. БС модулює сигнали користувачів кластера 1 на реальній компоненті, а сигнали користувачів кластера 2 на уявній компоненті сузір'я QPSK. Кожен користувач мобільного телефону знає, на якій компоненті знаходиться його повідомлення.

У кластері 1 мобільний термінал користувача  $W_1$  приймає сигнал усіх інших користувачів у часовому інтервалі 1 за допомогою алгоритму CO-NOMA-M, декодує весь сигнал та виконує операції SIC для отримання власного сигналу. Після декодування сигналу користувача  $W_2$  він пересилає сигнал мобільному телефону користувачеві  $W_2$  у другому інтервалі часу з використанням режиму ретрансляції. При цьому при блокуванні передачі



прямої видимості в терагерцовому діапазоні мобільний телефон користувача  $W_2$  отримує два сигнали, один від БС, а інший від користувача  $W_1$ . Система MRC (комбінуванням максимального співвідношення) декодує свій сигнал. Аналогічно, в кластері 2 мобільний телефон користувача  $W_3$  отримує сигнал користувача  $W_4$  разом зі своїм власним сигналом. Він також декодує та пересилає сигнал користувачу  $W_4$ .

Отже, запропоноване інноваційне рішення підвищує надійність функціонування децентралізованих мереж мобільного зв'язку 5G/6G при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні частот на основі спільного використання частотно-часових та енергетичних ресурсів із використанням ресурсів мобільних терміналів відповідних кластерів.

### 3.2. Оцінка ефективності функціонування удосконаленого алгоритму M-CO-NOMA

В режимі налаштування БС модулює сигнали віддалених користувачів на квадратурні компоненти, а сигнали ближніх користувачів на реальну складову сузір'я QPSK. Це робить сигнали повідомлень ортогональними, що запобігає завадам між сигналами віддалених та ближніх користувачів. У M-CO-NOMA найближчі користувачі не приймають сигнали повідомлень із завадами сигналів віддалених користувачів. Отже, їм потрібно застосовувати операції SIC лише для віднімання сигналів повідомлень ближніх користувачів. Тому ближнім та віддаленим користувачам необхідно виконувати операції SIC  $(N/2 - 1)$  разів. Порівняно з NOMA, CO-NOMA-M ближні користувачі виконують в  $N/2$  рази менше операцій SIC, але віддалені користувачі виконують таку саму кількість операцій SIC. У випадку чотирьох груп користувачів у стільнику, найближчі користувачі виконують операції SIC три рази на NOMA і тільки один раз на CO-NOMA-M. Слід зазначити, що з чотирьох груп користувачів CO-NOMA-M знижує обчислювальну складність до однієї третини ( $1/3$ ) значень порівняно з NOMA. У випадку віддалених користувачів кількість виконаних операцій SIC однакова, але у NOMA віддалені користувачі отримують сигнали з завадами не тільки від інших віддалених користувачів, але і від ближніх користувачів. Завади віддаленого користувача можуть бути вираховані за допомогою операцій SIC, але SIC не може бути виконаний для ближнього сигналу користувача через дуже низьку потужність цього сигналу, прийнятого віддаленим користувачем. У M-CO-NOMA-M сигнали ближніх користувачів в ідеалі не створюють завади для декодування віддалених користувачів, оскільки сигнали віддалених та ближніх користувачів ортогональні один одному. Отже, у CO-NOMA-M завади приймача для віддаленого користувача зменшуються в  $N/2$  рази відносно рівня базового алгоритму NOMA. У випадку  $N$  користувачів завади виникають у кожного користувача приймача  $(N - 1)$  користувачів NOMA і  $(N/2 - 1)$  користувачів CO-NOMA-M. Для чотирьох користувачів завади сигналу користувача викликані трьома користувачами алгоритму NOMA і тільки одним користувачем CO-NOMA-M. Отже, алгоритм CO-NOMA-M знижує обчислювальну складність до трьох разів для ближніх користувачів. Це також зменшує загальні завади системи у 6 разів.

На рисунку 3 представлено результат моделювання алгоритму CO-NOMA-M. На ньому зображено криві операцій SER для NOMA, M-NOMA та CO-NOMA-M.

У налаштуванні для моделювання використовували МАТЛАБ 2021a та наступні вихідні дані: канал загасання Релея, втрати сигналу 2, сумарна потужність передачі становить 1 Вт, коефіцієнти розподілу потужності вибираються відповідно до відстані до кожного мобільного телефону користувача, такі як  $a_1 = 0,15$ ,  $a_2 = 0,20$ ,  $a_3 = 0,25$ ,  $a_4 = 40$ .

Дані моделювання показують кращий результат для C-NOMA-M  $W_4$  порівняно з M-NOMA  $W_3$  і M-NOMA  $W_4$ , а CO-NOMA-M  $W_2$  перевершує NOMA  $W_3$ . Зрештою, CO-NOMA-M показує кращі результати порівняно з відомими методи NOMA.

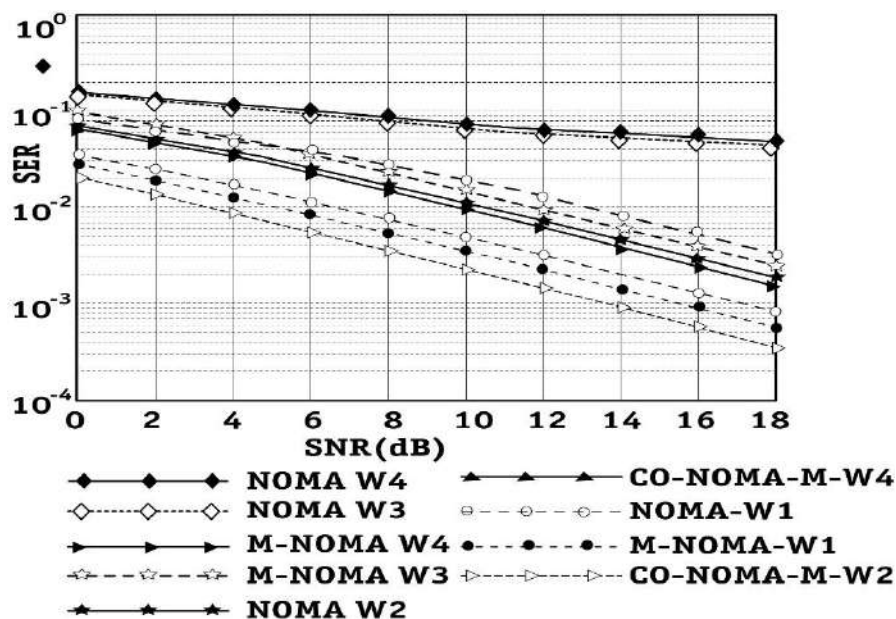


Рис. 3. Порівняння ефективності SER з використанням алгоритмів NOMA, M-NOMA та запропонованого CO-NOMA-M

### Висновки

1. У роботі запропоновано для забезпечення надійності функціонування децентралізованих мереж мобільного зв'язку 5G при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні частот удосконалений алгоритм NOMA на основі ретрансляції і модуляції.

2. На відміну від відомих він відрізняється тим, що, по-перше, перед випромінюванням у радіофір у першому часовому слоті проводиться кластеризація термінальних пристроїв у зоні обслуговування базової станції мобільної мережі із застосуванням алгоритму оцінки фрактальної розмірності і, по-друге, при формуванні загального транспортного сигналу для термінальних пристроїв абонентів базова станція модулює сигнали віддалених користувачів на квадратурну, а сигнали ближніх користувачів на реальній складовій сузір'я QPSK.

3. Показано, що пропонується удосконалений алгоритм ефективний за такими показниками, як зниження SER, обчислювальної складності, завдяки порівняно зі звичайним NOMA.

4. Інтегроване рішення на базі M-NOMA та CO-NOMA дозволило отримати нові інноваційні можливості щодо забезпечення передачі даних при блокуванні прямої передачі в терагерцовому діапазоні частот завдяки допоміжній ретрансляції сигналів між абонентами.

**Напрямок подальшої роботи** є розробка алгоритмів підвищення ефективності NOMA з урахуванням завдань між сигналами користувача, проблем безпеки, енергоефективності, досяжні швидкості передачі даних та затримки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 - 2018. URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37\\_series/37.340/](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/) (date accessed: 31.07.2019).
- Moltchanov D. Improving Session Continuity with Bandwidth Reservation in mmWave Communications / D. Moltchanov, A. Samuylov, V. Petrov et al. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. No. 7. P. 1–4.
- Сайко В. Г. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: монографія / В. Г. Сайко, Р. С. Одарченко, А. О. Абакумова, Т. М. Наритник, В. С. Наконечний, В. М. Домрачев, С. В. Толюпа, В. Ю. Заблоцький, П. Ф. Баховський. К.: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.

4. Сайко В., Наритник Т. Модель побудови бездротової терагерцової мережі з підвищеною надійністю зв'язку. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2023. № 2 (2). С. 166–181. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.16> (дата звернення: 10.03.2024).
5. Бакулин М. Г. Технология NOMA с кодовым разделением в 3GPP: 5G или 6G. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Том 16. С. 4–14.
6. Arachchillage, U. S. S. S., Jayakody, D. N. K., Biswash, S. K., Dinis, R. Samaratunge. Recent Advances and Future Challenges in Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA). *In IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTS)*. Porto, Portugal, 2018.
7. Rappaport T. S. 6G and beyond: Terahertz communications and sensing. 2019 Brooklyn 5G Summit Keynote, Apr. 2019. [Online]. Available: URL: <https://ieeetv.ieee.org/conference-highlights/keynote-tedrappaport-terahertz-communication-b5gs-2019?> (date accessed: 10.01.2024).
8. Zhang N., Wang J., Kang G., Liu Y. Uplink Non-orthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Communications Letters*. Mar. 2016. Vol. 20. No. 3. P. 458–461.
9. El-Sayed M. M., Ibrahim A. S., Khairy M. M. Power allocation strategies for Non-Orthogonal Multiple Access. *In International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT)*, Cairo, 2016.
10. Ding Z., Liu Y., Choi J., Sun Q., Elkashlan M., Chih-Lin I., Poor H. V. Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*. Feb. 2017. Vol. 55. No. 2. P. 185–191.
11. Benjebbour A., Saito K., Li A., Kishiyama Y., Nakamura T. Non-orthogonal multiple access (NOMA): Concept, performance evaluation and experimental trials. *In International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, Marrakech, 2015.
12. Islam S. R., Avazov N., Dobre O. A., Kwak K. S. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. Second quarter 2017. Vol. 19. No. 2. P. 721–742.
13. Jamal M. N., Hassan S. A., Jayakody D. N. K. A New Approach to Cooperative NOMA Using Distributed Space Time Block Coding. *In IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Montreal, 2017.
14. Qureshi S., Hassan S. A., Jayakody D. N. K. Divide-and-Allocate: An Uplink Successive Bandwidth Division NOMA System. *Transactions on emerging telecommunications technologies*. 19 Jun. 2012. Vol. 2. No. 10.
15. Xu P., Yuan Y., Ding Z., Dai X., Schober R. On the Outage Performance of Non-Orthogonal Multiple Access With 1-bit Feedback. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Oct. 2016. Vol. 15. No. 10. P. 6716–6730.
16. Wang Z., Cao J. NOMA-Based Spatial Modulation. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 3790–3800.
17. Zhong C., Hu X., Chen X., Ng D. W. K., Zhang Z. Spatial Modulation Assisted Multi-Antenna Non-Orthogonal Multiple Access. *IEEE Wireless Communications*. April 2018. Vol. 25. No. 2. P. 61–67.
18. Wang X., Wang J., He L., Song J. Spectral Efficiency Analysis for Downlink NOMA Aided Spatial Modulation With Finite Alphabet Inputs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Nov. 2017. Vol. 66. No. 11. P. 10562–10566.
19. Ding Z., Lei X., Karagiannidis G. K., Schober R., Yuan J., Bhargava V. K. A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Oct. 2017. Vol. 35. No. 10. P. 2181–2195.
20. Ding Z., Yang Z., Fan P., Poor H. V. On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users. *IEEE Signal Processing Letters*. Dec. 2014. Vol. 21. No. 12. P. 1501–1505.
21. Shahab M. B., Shin S. Y. On the Performance of a Virtual User-pairing Scheme to Efficiently Utilize the Spectrum of Unpaired Users in NOMA. *Physical Communication*. Dec. 2017. Vol. 25. P. 492–501.
22. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 160 с.
23. Берж К. Теория графов и ее применение. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 320 с.
24. Снитюк В. Є. Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми. К.: Маклаут, 2008. 364 с.