

К. П. Сторчак, А. О. Макаренко, Г. О. Гринкевич, В. І. Примаченко  
Державний університет телекомунікацій, м. Київ

## АЛГОРИТМ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ БАГАТОАНТЕННОГО КАНАЛУ З ЗАВАДАМИ

© Сторчак К. П., Макаренко А. О., Гринкевич Г. О., Примаченко В. І., 2016

Викладено матеріали проведених досліджень методів математичного моделювання сучасних систем широкосмугового безпроводового доступу. Наведено опис роботи розробленого алгоритму програмної реалізації багатоантенного каналу. Відмінною рисою цього алгоритму є врахування під час цифрової обробки сигналів кореляційних властивостей багатоантенного каналу зв'язку.

Ключові слова: безпроводове широкосмугове передавання даних, математичне моделювання, MIMO-канал, OFDM, алгоритм.

C. Storchak, A. Makarenko, G. Hrynkevych, V. Primachenko  
State University of Telecommunications, Kyiv

## ALGORITHM PROGRAM REALIZATION MULTI-ANTENNA CHANNEL WITH NOISE

© Storchak C., Makarenko A., Hrynkevych G., Primachenko V., 2016

The research findings in the sphere of mathematical modeling of modern broadband wireless access have been revealed in the article. Detailed description of algorithm program realized in multi-antenna channel has been provided. The distinctive feature of this algorithm is taking into account the digital signal processing correlation properties of multi-antenna channel.

It is obvious that no country can do without broadband infrastructure. The infrastructure includes broadband digital backbone of modern information economy. Today broadband infrastructure is essential to any modern economy, which plays the same role as water, transport or energy networks.

Everything mentioned above more than ever is important for broadband wireless technologies of data transmission (BWDT). The network operated by varieties of protocol IEEE 802.11 is the most common among BWDT. The most promising directions are increasing network capacity (standard 802.11ad) and development of protocol IEEE 802.11s standard IEEE 802.11, known as mesh-network.

A necessary condition for successful development of complex technical systems for any purpose is the development and widespread adoption of software designing methods by using mathematical modeling.

In the simulation environment of the software the simulation model circuit has input, output and processing blocks. Nowadays, BWDT system built according to the standards of 3GPP LTE, IEEE 802.11, and others are rapidly developing. Orthogonal frequency division multiplexing method (OFDM) combines these standards. With the growth of speed of BWDT there is substantial need for development of the Multiple Input Multiple Output (MIMO) method.

Based on the model of MIMO-channel program the algorithm of MIMO-channel is realized.

While using the algorithm I have obtained the graph of comparing circuit noise immunity of data transmission and range of the signal at the output OFDM-modulator and

**demodulator at the entrance, after the action on the signal attenuation and interference with the distribution of the communication channel.**

**Key words: broadband wireless data transmission, mathematical modeling, MIMO-channel, OFDM, algorithm.**

### **Вступ**

**Постановка проблеми.** Усе очевиднішим стає той факт, що жодна країна не може обійтися без широкосмугової інфраструктури. В інфраструктуру широкосмугового зв'язку входять цифрові магістралі сучасної інформаційної економіки. Сьогодні широкосмуговий зв'язок є найважливішою інфраструктурою у будь-якій сучасній економіці, що відіграє таку ж життєво важливу роль, як і водні, транспортні або енергетичні мережі. Справді, в сучасній економіці інфраструктура широкосмугового зв'язку може часто інтегруватися з водними, транспортними й енергетичними мережами, щоб сформувати інтелектуальні розподілені мережі, що дають змогу ефективніше використовувати ресурси [1].

Сьогодні загально визнано, що інвестиції в широкосмугову інфраструктуру ІКТ можуть сприяти міжнародній конкурентоспроможності країн, створенню висококваліфікованих робочих місць і зміцненню підприємств за рахунок підвищення їх динамічності. Стає усе очевиднішим, що країни, які розвиваються, не можуть дозволити собі втратити можливості для розвитку, росту і торгівлі, що пропонує інфраструктура широкосмугового зв'язку. Відмова від інвестицій в інфраструктуру і послуги широкосмугового зв'язку загрожує країні втратою доступу не лише до системи плодів інформаційної революції, але і реальних можливостей для економічного зростання і створення робочих місць [1, 2].

Вже проведено великий обсяг дослідницьких робіт, результати яких свідчать про позитивну віддачу і потужні зовнішні чинники та наслідки інвестицій в електрозв'язок і ІКТ.

Все зазначене, як ніколи, актуальне для технологій безпроводового широкосмугового передавання даних (ШБД). Як не розглядати і не визначати широкосмуговий зв'язок, він здатен надійно надавати конвергентні послуги і забезпечувати одночасне комбіноване передавання голосу, даних і відео, потенційно по різних мережах. На широкосмугових з'єднаннях основані різні послуги, інформація і додатки – від підвищеної реальності для фізичних осіб до дистанційного доступу до зображень і діагностики в медицині, розподілених обчислювальних завдань в академічних дослідженнях, інтерактивних дистанційних онлайн-класів у освіті – і багато іншого, чого поки що не можна навіть уявити. В майбутньому надання послуг з охорони здоров'я, освіти, банківської справи, бізнесу, торгівлі й у державних органах спиратиметься на платформи на базі широкосмугового зв'язку, тому всі країни повинні розробляти плани “майбутнього, ґрунтованого на широкосмуговому зв'язку” [3].

Найбільшого поширення серед технологій ШБД набули мережі під управлінням різновидів протоколу IEEE 802.11. Успіх цього протоколу пояснюється високими швидкостями передавання даних, широким набором сервісів, величезним діапазоном пристроїв, представлених на ринку, що підтримують цей стандарт мереж. Сьогодні більшість сучасних ноутбуків, смартфонів і навіть багато моделей цифрових фото- і відеокамер, принтерів використовують мережі цього протоколу. У великих містах світу Wi-Fi доступ до Інтернету є у місцях найбільшого скупчення жителів, а в більшості аеропортів і багатьох кафе у всьому світі безпроводний доступ до Інтернету безкоштовний.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найперспективнішими напрямками є збільшення пропускної здатності мереж [4, 5] (стандарт 802.11ad) та розвитку протоколу IEEE 802.11s стандарту IEEE 802.11, відомого, як mesh-мережі [6, 7].

Дослідження ШБД і механізмів, використовуваних для їх побудови, стосується значна кількість робіт вчених: Л. Н. Беркман, М. М. Климаш, О. В. Лемешко, В. М. Вишневського, А. І. Ляхова, G. R.Hiertz, S. C. Bruell, L. Kleinrock, H. Takagi, L. Fratta та ін.

Однак коло невирішених завдань безперервно зростає, і моделі, побудовані всього кілька років тому, вже не задовольняють всі вимоги й особливості сучасних ШБД [4, 5, 8], що робить актуальними дослідження, описані у цій статті.

Одним із суттєвих методів дослідження і удосконалення технологій ШБД є математичне моделювання. Математичне моделювання найширше застосовується в науці, техніці, економіці й освіті [8, 9]. Поява на початку 80-х років ХХ ст. ПК створила реальні умови для реалізації на них вже доволі серйозних спеціалізованих систем математичного моделювання, в яких повністю автоматизована підготовка моделей.

Паралельно з розробленням таких програм швидкими темпами розвивається новий перспективний науковий напрям – комп’ютерна математика [9]. На ринок випущено низку програм комп’ютерної математики – Mathcad, Maple, Mathematica, Matlab та ін.

Серед таких програм моделювання видне місце зайняла система блокового імітаційного моделювання Simulink, інтегрована з потужною матричною системою комп’ютерної математики Matlab. Останнім часом різко зріс інтерес до невеликої за об’ємом (але доволі потужної за можливостями) універсальної системи блокового імітаційного візуального математичного моделювання VisSim [9]. Разом із самою системою VisSim випущена низка пакетів її розширення, що істотно підвищують і без того великі можливості системи. До них належить пакет VisSimCom для моделювання процесів, що відбуваються у телекомунікаційних системах та мережах. Методи та підходи до математичного моделювання телекомунікаційних систем висвітлено, наприклад, в [4, 5, 8, 9, 11].

**Мета статті** полягає у висвітленні матеріалів проведених досліджень методів математичного моделювання сучасних систем ШБД та опису роботи розробленого алгоритму програмної реалізації багатоканального каналу.

### Основний матеріал

Необхідною умовою успішних розробок складних технічних систем будь-якого призначення є розвиток і широке впровадження методів їх проектування із застосуванням програм математичного моделювання.

У широкому змісті під моделюванням варто розуміти процес адекватного відображення найістотніших аспектів досліджуваного об’єкта або явища з точністю, що необхідна для практичних потреб. У загальному випадку моделюванням можна назвати також особливу форму узагальнення, основою якого є формалізований підхід до дослідження складної системи [4, 10].

Технологія моделювання складних технічних систем, до класу яких належать ТКС, спирається на імітаційне програмне моделювання. Термін “імітаційне моделювання” часто ототожнюється з терміном “статистичне моделювання” [11]. Статистичне моделювання як метод машинної реалізації імітаційних моделей систем, схильних до випадкових дій, використовується найширше.

В основу статистичного моделювання покладено процедуру, яка використовується для моделювання випадкових величин і функцій – метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло).

Загальну схему методу Монте-Карло можна записати у вигляді [4, 11, 12]

$$M(x) = \int y(x) p(x) dx. \quad (1)$$

Результат шукають як математичне очікування деякої випадкової величини  $y_1, y_2, y_N$ , яка найчастіше є невідомою функцією випадкової величини  $x_1, x_2, x_N$ , що має розподіл  $p(x)$ . Наближену оцінку невідомого математичного очікування, що збігається із шуканим результатом, знаходять як середнє арифметичне результатів незалежних дослідів

$$\hat{M}(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(x_i), x_i \approx p(x). \quad (2)$$

Результати статистичного моделювання є випадковими, тому для забезпечення статистичної стійкості їхні оцінки визначаються як середнє за великою кількістю реалізацій. Вибір кількості реалізацій визначається вимогами до результатів моделювання. Чим більше реалізацій, тим вища точність моделювання складної системи.

У разі моделювання у програмному середовищі Matlab Simulink імітаційна модель схеми має вхідні, вихідні та блоки обробки даних (рис. 1) [12].

Алгоритм поведінки моделі системи описується [12, 13]

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)), \quad (3)$$

де  $x$  – вектор стану системи,  $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$ ;  $u$  – вектор керування,  $u = (u_1, \dots, u_q)^T \in U \subseteq R^q$ ,  $U$  – деяка задана множина припустимих значень рівняння;  $t$  – час,  $t \in T = [t_0, t_1]$  – проміжок часу функціонування системи;  $f(t, x, u)$  – неперервна разом зі своїми частковими похідними вектор-функція.

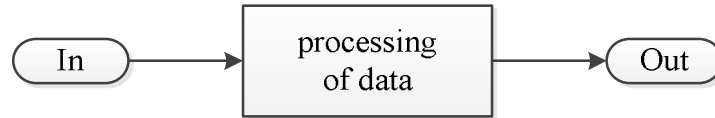


Рис. 1. Структурна схема взаємодії елементів моделі

Сьогодні бурхливо розвиваються системи ШБД, побудовані за стандартами 3GPP LTE, IEEE 802.11 тощо. Ці стандарти об'єднує метод ортогонального частотного мультиплексування (OFDM). Зі зростанням швидкості передавання систем ШБД з'явилась необхідність у розвитку методу багатоантенних систем (MIMO).

Моделі MIMO-каналу переважно поділяються на дві категорії, як показано на рис. 2 [14].

Імпульсний відгук MIMO-каналу оцінюється за радіохвилею, що поширюється від передавача до приймача. Модель каналу MIMO визначається на основі експериментальних вимірювань, виконаних для визначення параметрів поширення сигналу в каналі з урахуванням конфігурації антен і у передавачі, й у приймачі, поляризації антени, розсіювання тощо. До фізичних моделей належать і детерміновані, і стохастичні моделі каналу на геометричній основі – Geometry-based stochastic channel models (GSCMs):

- детерміновані моделі визначають модель каналу відповідно до передбачення поширення сигналу;
- моделі GSCMs безпосередньо пов'язані із фізичними характеристиками каналу поширення.

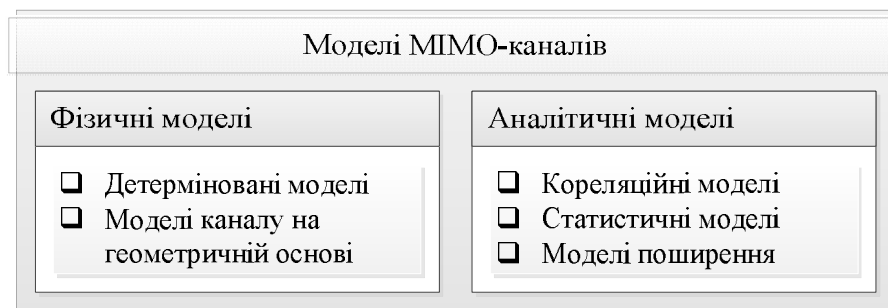


Рис. 2. Математичні моделі MIMO-каналу

Ці моделі припускають, що кластери розсіювання розподілені навколо передавача і приймача. Місцеположення розсіювачів визначають довільно, що впливає на їх ймовірнісний розподіл. Розсіювачі впливають на дискретний канал і можуть зумовлювати статистичну зміну декількох параметрів поширення сигналу, таких як поширення затримки, кутовий розкид, просторову кореляцію і дискримінацію крос-поляризації. Ми розрізняємо дві можливі схеми моделей: двозонну – Double Bounce Geometry-based Stochastic Channel Models (DB-GSCMs) й однозонну модель каналу – Single Bounce Geometry-based Stochastic Channel Models (SB-GSCMs) – тобто таку, в якій навколо передавальних або приймальних антен є лише одна зона розсіювачів.

До другого класу моделей MIMO-каналу належать аналітичні моделі, основані на статистичних властивостях, отриманих за допомогою вимірювань (розподілу вихідного напрямку – Distribution of Direction of Departure, розподілу вхідного напрямку – Distribution of Direction of Arrival). Аналітичні моделі каналу можна класифікувати на кореляційні моделі (наприклад, модель

незалежних однаково розподілених випадкових величин, модель Кронекера, модель Кейхола), статистичні моделі (наприклад, модель Салех–Валенсуела та модель Цвік) і моделі поширення (наприклад, модель Мюллера та модель повного розсіювання).

Модель системи МІМО показано на рис. 3 [14, 15]. Представимо систему зв'язку передавальними антенами  $N_T$  і приймальними антенами  $N_R$ .

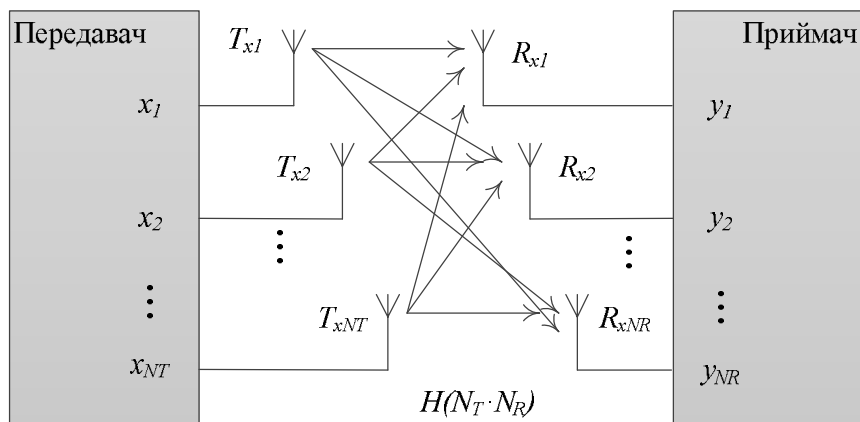


Рис. 3. Структурна схема модель МІМО-системи

Анени  $T_{x1}, \dots, T_{xNT}$  відповідно надсилають сигнали  $x_1, \dots, x_{NT}$  на приймальні антени  $R_{x1}, \dots, R_{xNR}$ . Кожна приймальна антена об'єднує вхідні сигнали, які послідовно складаються. Отримані сигнали на антенах  $R_{x1}, \dots, R_{xNR}$  відповідно позначаються  $y_1, \dots, y_{NR}$ .

Прийнятий сигнал на антені  $T_{xq}$ ;  $q=1, \dots, N_R$  виражаємо як:

$$y_q = \sum_{p=1}^{N_T} h_{qp} \cdot x_p + b_q; q=1, \dots, N_R. \quad (4)$$

Модель завмирання МІМО каналу описується відношенням введення–виведення в такому вигляді:

$$y = H \cdot x + b, \quad (5)$$

де: 1)  $H$  – комплексна матриця розмірністю  $(N_R \cdot N_T)$ , що визначена як:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \mathbf{K} & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \mathbf{K} & h_{2N_T} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ h_{NR1} & h_{NR2} & & h_{NRN_T} \end{bmatrix}$$

$h_{qp}$ ;  $p=1, \dots, N_T$ ;  $q=1, \dots, N_R$  – комплексні коефіцієнти підсилення каналу між передавальними антенами  $T_{x_p}$  і приймальними антенами  $R_{x_p}$ .

2)  $x = [x_1, \mathbf{K}, x_{N_T}]^T$  комплексний вектор  $(N_T \cdot 1)$  переданого сигналу;

3)  $y = [y_1, \mathbf{K}, y_{N_R}]^T$  комплексний вектор  $(N_R \cdot 1)$  прийнятого сигналу;

4)  $b = [b_1, \mathbf{K}, b_{N_R}]^T$  комплексний вектор  $(N_R \cdot 1)$  адитивного шуму сигналу.

Модель безперервної часової затримки  $(N_R \cdot N_T)$  МІМО-каналу  $H$  із затримкою часу  $\tau$  і шумом сигналу  $b(t)$  виражається як:

$$y(t) = \int_t H(t, t) x(t - \tau) dt + b(t), \quad (6)$$

де  $y(t)$  – просторово-часовий вихідний сигнал;  $x(t)$  – просторово-часовий вхідний сигнал;  $b(t)$  – просторово-часовий шумовий сигнал.

На основі наведеної моделі та з використанням [16] програмно реалізовано алгоритм роботи МІМО-каналу (рис. 4).

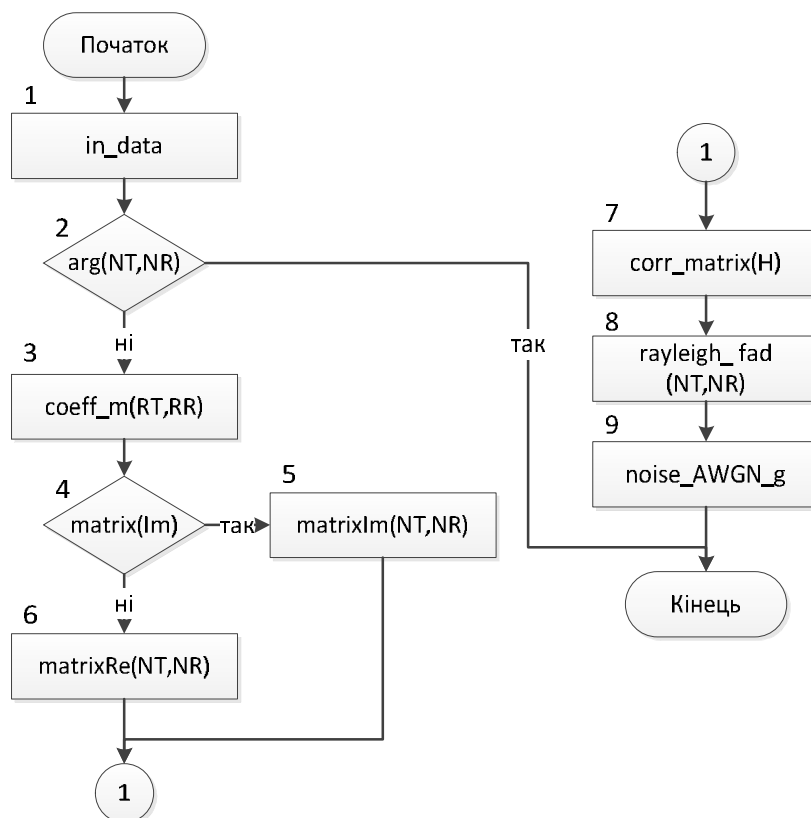


Рис. 4. Алгоритм програмної реалізації моделі МІМО-каналу

Розглянемо принцип роботи алгоритму програми. На вхід першого блока надходять дані від OFDM-модулятора передавача (для імітаційних досліджень використано алгоритм OFDM-модулятора [17]). В першому блоці за попередніх налаштувань є також можливість вибрати антенну схему передавання МІМО-каналу та відношення сигнал/завада в каналі. Другий блок виконує аналіз кореляційних властивостей вхідних і визначених даних на достатність для МІМО-каналу. В блоках 3–6 виконуються операції обчислення дійсної та уявної складових кореляційної матриці. Блок 7 завершує роботу основного алгоритму побудовою каналної матриці з урахуванням кореляційних властивостей каналу зв'язку. Додавання характеристик релієвського каналу з завмираннями та завад у моделі адитивного білого гауссового шуму виконується в блоках 8 та 9 відповідно.

Інтеграцію цього продукту виконано за допомогою бібліотек, що динамічно підключаються до програми комп'ютерної математики Mathcad, та здійснено порівняння завадостійкості схем передавання даних.

Аналізуючи графіки залежностей, наведені на рис. 5, можна визначити, що схеми передавання несиметричні; тобто схема з двома приймальними антенами випереджає схему з двома передавальними антенами за завадостійкістю приблизно на 2 дБ SNR.

Отже, застосування технології МІМО під час побудови системи ШБД має переваги, серед яких:

- збільшена порівняно зі схемою SISO стійкість до виникнення внаслідок завмирань у радіо-каналі помилкових бітових блоків у сигналі, що приймається;
- збільшена порівняно зі схемою SISO пропускна спроможність системи загалом за рахунок одночасного передавання декількох символів OFDM в один період часу з використанням декількох передавальних радіоантен;
- краща стійкість до впливу з боку ефекту Доплера.

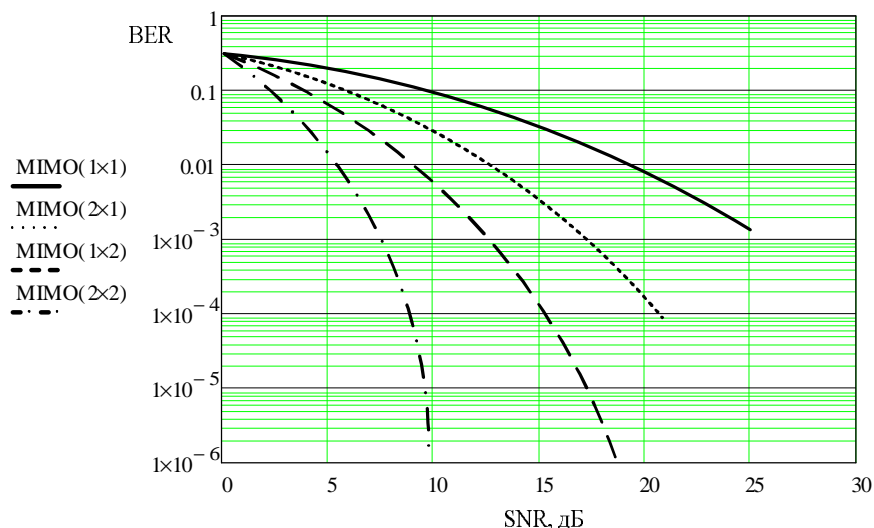


Рис. 5. Порівняння завадостійкості антенних схем передавання даних

Під час подальших досліджень виконано інтеграцію розробленого алгоритму з програмним середовищем Matlab. Структурна схема системи ШБД не наводиться, оскільки є стандартною з використанням OFDM.

Використавши розроблений алгоритм у програмному середовищі Matlab, отримали спектр сигналу на виході OFDM-модулятора (рис. 6, а) та на вході демодулятора, після дії на корисний сигнал завад та загасання під час поширення по каналу зв'язку. Аналізуючи рис. 6, б, зазначимо, що адаптація до обстановки в умовах завад системи ШБД з використанням OFDM здійснюється без втрати даних. Наприклад, якщо одна з робочих частот уражена завадою, вона просто відключається (це видно на частотах  $-8$ ,  $-6$  та  $8$  МГц). Однак переданий на ураженій частоті пакет даних не втрачається, а автоматично відновлюється під час подальшого оброблення інформації в приймачі.

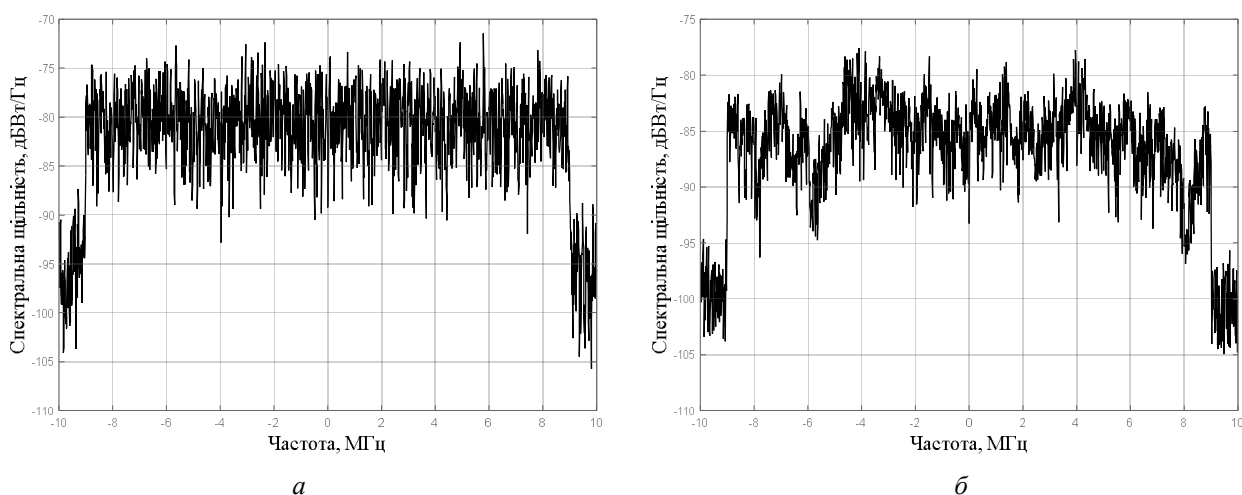


Рис. 6. Спектр сигналу на виході OFDM-модулятора (а) та після виконання операцій ЦОС згідно з алгоритмом програмної реалізації моделі МІМО-каналу (б)

## Висновки

Зробимо висновки:

- необхідною умовою успішних розробок складних технічних систем будь-якого призначення є розвиток і широке впровадження методів їх проектування із застосуванням програм математичного моделювання. Серед програмного забезпечення математичного моделювання найвідповіднішими для дослідження є Matlab Simulink та VisSim.

- в статті наведено опис роботи розробленого алгоритму програмної реалізації багатоантенного каналу. Цей алгоритм дає змогу інтегруватись з програмами комп'ютерної математики, такими як Matlab Simulink та Mathcad, та проводити дослідження безпроводових систем зв'язку. Відмінною рисою цього алгоритму є врахування у ЦОС кореляційних властивостей багатоантенного каналу зв'язку.

1. *19-th ITU plenipotentiary conference: final acts. BEXCO, Busan, Republic of Korea: 20 October – 7 November 2014.* 2. Толубко В. Б. Влияние информационно-телекоммуникационных технологий на мировую экономику // Международная научно-техническая конференция “Современные информационно-телекоммуникационные технологии”. Киев. 17–20 ноября 2015 г. Т. 1. С. 6–10. 3. *World Telecommunication / ICT Policy Forum: final acts. Geneva, Switzerland: 14 to 16 May 2013.* 4. Кривуца В. Г., Барковський В. В., Беркман Л. Н. Математичне моделювання телекомунікаційних систем: навч. посіб. Київ: Зв'язок, 2007. 270 с. 5. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. Київ: Техніка, 2004. 576 с. 6. Lemeshko A. V. Design and analysis of two-index model of frequency channels distribution in a multichannel mesh-network of IEEE 802.11 / S. V. Garkusha; A. H. Abed // IEEE Xplore. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?> (01.02.2016). 7. Xudong Wang. IEEE 802.11s wireless mesh networks: Framework and challenges / Xudong Wang, Azman O. Lim // IEEE Xplore. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?> (01.03.2016.). 8. Чернихівський Є. М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навч. посіб. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 272 с. 9. Дьяконов В. П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. Москва: СОЛОН-Пресс, 2004. 384 с. 10. Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Проектування телекомунікаційних мереж. Київ: Техніка, 2002. 792 с. 11. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Моделирование телекоммуникационных сетей. СПб.: [без издательства], 2001. 76 с. 12. Лазарев Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab: електронний навч. посіб. Київ: НТУУ “КПІ”, 2011. 421 с. 13. Пантелеев А. В., Бортакoвский А. С. Теория управления в примерах и задачах: учеб. пособ. Москва. Высш. шк., 2003. 583 с. 14. Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems / Almers P., Bonek E., Burr A., Czink N., Debbah M., Degli-Esposti V., Hofstetter H., Kyosti P., Laurenson D., Matz G., Molisch A. F., Oestges C., Ozelik H. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. URL: [http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-et\\_13071.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-et_13071.pdf) (01.03.2016) 15. Maha Ben Zid Recent Trends in Multi-user MIMO Communications // InTech, Chapters published. URL: <http://www.intechopen.com/books/recent-trends-in-multi-user-mimo-communications> (01.03.2016.). 16. IEEE Std 802.11-2013: IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE, New York, NY, USA, 1999–2013. 17. Макаренко А. О., Гринкевич Г. О. Розробка імітаційної моделі та алгоритмів функціонування MIMO-системи // Зв'язок. 2012. № 2. С. 29–33.