

**О. Ю. Мирончук<sup>1</sup>**  
**М. В. Шпилька<sup>1</sup>**  
**О. М. Цибровський<sup>1</sup>**  
**О. О. Шпилька<sup>1</sup>**

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛУ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ З ТЕХНОЛОГІЄЮ OFDM**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Системи зв'язку є ключовим інструментом у розвитку сучасного суспільства. Розвиток технологій зумовлює потребу у високошвидкісному обміні даними у великих обсягах. Тому удосконалення наявних та створення нових систем зв'язку є актуальним завданням. Однією з найперспективніших технологій для розвитку цифрових систем зв'язку є ортогональне частотне мультиплексування (OFDM). Головною перевагою OFDM є його висока стійкість до багатопроменевого поширення сигналу (multi-path fading). У міському середовищі, де радіохвилі відбиваються від будівель, сигнал надходить до приймача з різними затримками, що спричиняє міжсимвольні перешкоди (ISI). OFDM вирішує цю проблему, розділяючи високошвидкісний потік даних на багато повільних підпотоків, кожний з яких передається на окремій, вузькій підносійній частоті. Завдяки цьому, символи стають довшими ніж затримки, спричинені відбиттями, що мінімізує вплив ISI. До того ж OFDM забезпечує високу спектральну ефективність, тобто дозволяє передавати більше даних на одиницю смуги частот. Це досягається завдяки ортогональності підносійних, спектри яких перекриваються, але не заважають один одному. Це дозволяє щільно «упакувати» підносійні, максимально використовуючи доступний частотний діапазон. У роботі проаналізовано методи оцінювання імпульсної характеристики каналу зв'язку в системах зв'язку з технологією OFDM. Оцінювання параметрів каналу зв'язку є важливим етапом в роботі OFDM систем, оскільки від точності оцінки параметрів каналу залежить кількість помилок, яка виникає під час передачі інформації. Зокрема розглянуто метод послідовності максимальної довжини (MLS), який не потребує апріорної інформації про канал, та метод мінімуму середньоквадратичної помилки (LMMSE), для роботи якого необхідно знати автоковаріаційну матрицю каналу. Ці методи широко використовуються на практиці, проте мають свої недоліки. Аналіз ефективності роботи методів проводився на модельному прикладі шляхом статистичного моделювання. Канал зв'язку описувався за моделлю Релея. Результати аналізу показали, що метод MLS простий в реалізації, проте демонструє гіршу точність оцінювання у порівнянні з методом LMMSE. Метод LMMSE показує вигаши до 2 дБ в у порівнянні з методом MLS, проте має на порядок вищу обчислювальну складність.*

**Ключові слова:** OFDM, цифровий зв'язок, безпроводний канал зв'язку, багатопроменеве поширення сигналів, частотна характеристика, імпульсна характеристика, оцінювання параметрів каналу.

### **Вступ**

Технологія ортогонального частотного мультиплексування (з англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) є основою сучасних і перспективних систем цифрового зв'язку, оскільки ця технологія дозволяє забезпечувати високі швидкості передачі даних і з високою ефективністю використовувати радіочастотний спектр [1]. Проте зауважимо, що OFDM системи зв'язку чутливі до частотних зсувів, помилок у часовій синхронізації та фазового шуму [2], [3]. Під час прийому OFDM сигналів одним із ключових етапів є оцінювання параметрів каналу зв'язку, зокрема частотної характеристики [4], [5]. Оцінювання значень частотної характеристики може відбуватися як в

частотній області безпосередньо, так і в часовій шляхом оцінювання значень імпульсної характеристики з подальшим використанням апарату дискретного перетворення Фур'є для повернення в частотну область. В подальшому оцінені значення частотної характеристики використовуються для демодуляції даних. Що точніше значення частотної характеристики каналу будуть оцінені, то менше помилок виникатиме в процесі передачі інформації. Методи оцінювання частотної характеристики каналу зв'язку поділяються на так звані «сліпі» і такі, що використовують пілотні сигнали в структурі OFDM символів [6], [7]. Зазвичай на практиці використовується другий тип методів, який зокрема підходить для застосування математичного апарату фільтра Калмана [8], [9]. Метою цієї статті є порівняльний аналіз методу послідовності максимальної довжини MLS та методу мінімуму середньоквадратичної помилки LMMSE, які застосовуються для оцінювання імпульсних характеристик каналів зв'язку в OFDM системах та використовують пілотні сигнали в структурі OFDM символів. Результати аналізу дозволять визначити переваги та недоліки розглянутих методів і стануть основою для їх подальшого удосконалення, а також розробки нових методів, які дозволять підвищити якість роботи OFDM систем зв'язку.

### Структура OFDM символу

Суть технології OFDM полягає в тому, що послідовний потік даних розбивається на паралельні потоки, які одночасно передаються на ортогональних підносійних частотах. При цьому сигнал на кожній з частотних підносійних модулюється  $M$ -позиційною фазовою маніпуляцією або квадратурною модуляцією високих порядків. Кількість підносійних  $N$  в структурі OFDM символу визначається необхідною смугою частот, частотою дискретизації та розміром вікна зворотного дискретного перетворення Фур'є, яке використовується для формування часових відліків OFDM символу. Принцип формування OFDM символу показано на рис. 1.

Варто зазначити, що передача даних ведеться не на всіх підносійних OFDM символу. Структура OFDM символу в частотній області показана на рис. 2.

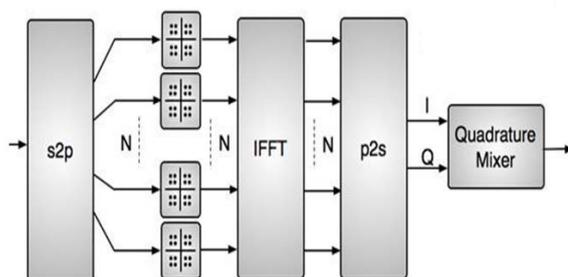


Рис. 1. Принцип формування OFDM символу

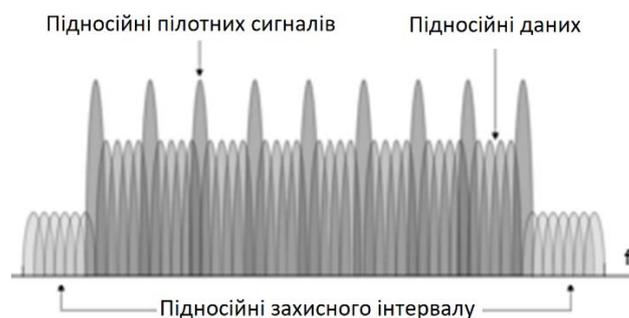


Рис. 2. Структура OFDM символу в частотній області

Як випливає з рис. 2, частина підносійних застосовується для передачі пілотних сигналів, які відомі і передавачу і приймачу. На основі інформації, яку несуть пілотні сигнали, приймач виконує оцінку параметрів каналу зв'язку. Окрім підносійних з пілотними сигналами в структурі OFDM символу є підносійні, на яких не передаються ніякі дані. Такі підносійні розміщуються на краях смуги сигналу і виконують функції захисного інтервалу для зменшення міжканального впливу.

### Параметри каналів зв'язку

Під час проходження через безпровідний канал зв'язку сигнал зазнає впливу багатьох фізичних явищ, до яких зокрема відносяться багатопроменеve поширення, відбиття, дифракція, ефект Доплера та інші. Основними параметрами каналів зв'язку, які описують вплив каналу на сигнал, є імпульсна (Channel Impulse Response — CIR) і частотна (Channel Frequency Response — CFR) характеристики, які пов'язані між собою через дискретне перетворення Фур'є.

Імпульсна характеристика багатопроменеveго каналу описується часовими затримками та коефіцієнтами затухання різних променів поширення сигналу

$$h_{rf}(t) = \sum_i h_i(t) \cdot \delta(t - \tau_i), \quad (1)$$

де  $h_i(t)$  — коефіцієнт затухання в  $i$ -му промені;  $\tau_i$  — затримка поширення по  $i$ -му променю.

Для опису каналів зв'язку на практиці широко використовуються моделі Релея та Райса [10]. В цих моделях враховуються і адитивні і апліквативні шуми, зумовлені багатопроменевим поширенням радіохвиль та рухом об'єктів у просторі. На рис. 3 і рис. 4 наведено приклад імпульсної і частотної характеристик каналу зв'язку, який описується моделлю Релея з трьома променями поширення сигналу та частотою Доплера 10 Гц. Ця модель застосовується у випадках, коли прямої видимості між передавачем та приймачем немає, що дуже актуально для систем зв'язку, які працюють в умовах міської забудови.

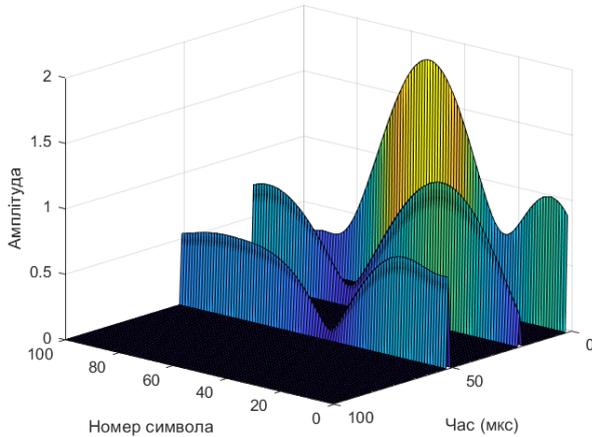


Рис. 3. Імпульсна характеристика каналу з трьома променями поширення сигналу та частотою Доплера 10 Гц

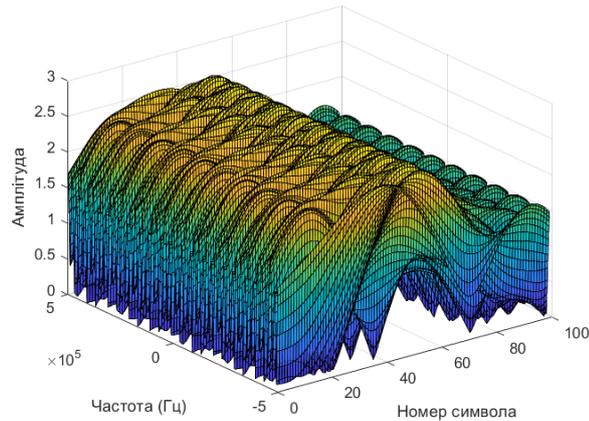


Рис. 4. Частотна характеристика каналу з трьома променями поширення сигналу та частотою Доплера 10 Гц

### Постановка задачі

Після вилучення циклічного префіксу вектор відліків прийнятого OFDM символу в часовій області описується таким рівнянням [1]

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} \otimes \mathbf{h} + \mathbf{v}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{x}$  — вектор переданого сигналу в часовій області;  $\mathbf{h}$  — вектор імпульсної характеристики каналу;  $\mathbf{v}$  — вектор білого гаусівського шуму;  $\otimes$  — циклічна згортка.

Для переходу в частотну область до вектору відліків прийнятого OFDM символу в часовій області застосовується дискретне перетворення Фур'є. Прийнятий OFDM символ в частотній області описується таким рівнянням:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{H} + \mathbf{V}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{X}$  — діагональна матриця з переданим сигналом на головній діагоналі;  $\mathbf{H}$  — вектор частотної характеристики каналу зв'язку;  $\mathbf{V}$  — вектор білого гаусівського шуму.

Таким чином необхідно оцінити вектор імпульсної характеристики каналу  $\mathbf{h}$  за умови, що відомі значення прийнятого OFDM символу в часовій області  $\mathbf{y}$  та значення переданого сигналу в частотній області на позиціях пілотних підносійних з матриці  $\mathbf{X}$ . Значення білого гаусівського шуму при цьому є невідомими.

### Метод MLS

Цей метод використовує властивості сигналу, що має вигляд послідовності максимальної довжини (з англ. Maximum Length Sequence — MLS) або M-послідовності. Сама по собі послідовність максимальної довжини — це періодична псевдовипадкова послідовність нулів і одиниць, яка формується за допомогою зсувного регістру. Послідовність максимальної довжини є періодичною. Період такої послідовності визначається за формулою [11]

$$P = 2^L - 1, \quad (4)$$

де  $L$  — порядок послідовності, який відповідає розрядності зсувного регістру.

В часовій області взаємна кореляція між переданим і прийнятим сигналом, що пройшов через канал, описується рівнянням [12]

$$R_{yx}(n) = R_{xx}(n) \otimes h(n) + R_{vx}(n), \quad (5)$$

де  $R_{xx}$  — автокореляція переданого сигналу;  $R_{vx}$  — взаємна кореляція між переданим сигналом і шумом;  $n$  — індекс семпла в часовій області.

Враховуючи те, що сигнал, який передається, не корелює з шумом, вираз (5) набуде вигляду

$$R_{yx}(n) = R_{xx}(n) \otimes h(n). \quad (6)$$

Відомо, що автокореляція псевдовипадкових процесів має вигляд дельта функції. За теоремами про спектральний аналіз, результатом згортки сигналу з дельта функцією є сам сигнал. Таким чином, оцінка імпульсної характеристики методом MLS має такий вигляд:

$$\hat{h}_{MLS}(n) = R_{yx}(n). \quad (7)$$

Зауважимо, що послідовність даних, яка передається в OFDM символі, є також випадковим процесом. Таким чином цей підхід можна застосувати для оцінювання імпульсної характеристики каналу в OFDM системах. При цьому взаємна кореляція між переданим і прийнятим сигналом буде розраховуватись за відомими даними, які передаються на позиціях пілотних сигналів в структурі OFDM символу.

### Метод LMMSE

Цей метод забезпечує оцінку з мінімальною середньоквадратичною помилкою і набув широкого застосування для оцінювання імпульсних характеристик каналів зв'язку в OFDM системах. З англійської LMMSE — Linear Minimum Mean Square Error.

Оцінка імпульсної характеристики методом LMMSE описується наступними рівняннями [13]

$$\hat{\mathbf{h}}_{LMMSE} = \mathbf{R}_{hY} \mathbf{R}_{YY}^{-1} \mathbf{Y}, \quad (8)$$

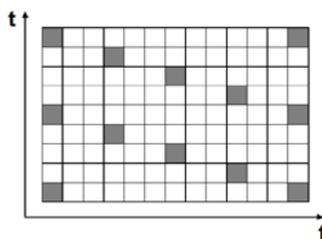
$$\mathbf{R}_{hY} = E\{\mathbf{h}\mathbf{Y}^H\} = E\{\mathbf{h}(\mathbf{X}\Phi\mathbf{h} + \mathbf{V})^H\} = \mathbf{R}_{hh} \Phi^H \mathbf{X}^H, \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{YY} = E\{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H\} = \mathbf{X}\Phi\mathbf{R}_{hh}\Phi^H\mathbf{X}^H + \sigma_V^2 \mathbf{I}_V, \quad (10)$$

де  $\mathbf{R}_{hY}$  — взаємно коваріаційна матриця між  $\mathbf{h}$  та  $\mathbf{Y}$ ;  $\mathbf{R}_{YY}$  — автоковаріаційна матриця  $\mathbf{Y}$ ;  $\mathbf{R}_{hh}$  — автоковаріаційна матриця  $\mathbf{h}$ ;  $\Phi$  — матриця дискретного перетворення Фур'є;  $\sigma_V^2$  — коваріаційна матриця шуму;  $(\cdot)^H$  — ермітове спряження.

Оцінювання цим методом можливе шляхом використання інформації, яка передається на підносійних з пілотними сигналами в структурі OFDM символу. При цьому автоковаріаційна матриця  $\mathbf{R}_{hh}$  має бути відомою.

### Результати досліджень



■ - Підносійні з пілотними сигналами  
□ - Підносійні з даними

Рис. 5. Розміщення пілотних сигналів за схемою паралелограмної решітки

Дослідження розглянутих методів оцінювання імпульсної характеристики каналу зв'язку в OFDM системах проводилося на модельному прикладі шляхом статистичного моделювання. Канал зв'язку описаний за моделлю Релея [14], [15] з такими параметрами: частота Доплера — 10 Гц, максимальний час затримки в каналі — 10 мкс, рівень потужності кожного з променів вибирався випадково. При цьому використовувались такі параметри OFDM-символу: кількість підносійних  $N = 1024$ , захисний інтервал — 256 підносійних, частота дискретизації — 1 МГц. На інформаційних підносійних передавалися рівномірні символи з сузір'я QPSK. На підносійних пілотних сигналів передавалися символи з сузір'я QPSK. Для кожної реалізації каналу оброблялися 128 OFDM-символів. Схема розміщення пілотних сигналів у структурі OFDM символу мала вигляд паралелограмної решітки, яка показана на рис. 5.

Враховуючи те, що розглянутими методами інформацію про канал можна отримати лише на позиціях розміщення пілотних сигналів, для розрахунку бітової помилки під час передачі необхідно

виконати інтерполяцію частотної характеристики на підносійні з даними. Для цього під час моделювання використовувалась інтерполяція за допомогою дискретного перетворення Фур'є. На рис. 6 та рис. 7 показані результати моделювання у вигляді залежностей середньо квадратичної похибки (MSE) і бітової помилки (BER) від відношення сигнал/шум (SNR).

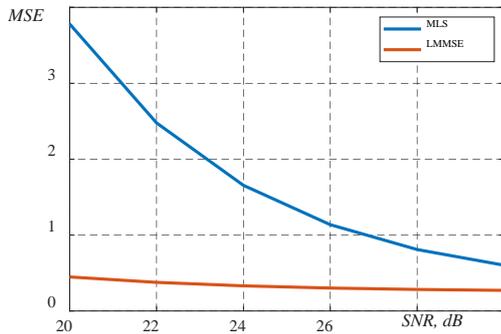


Рис. 6. Імпульсна характеристика каналу з трьома променями поширення сигналу та частотою Доплера 10 Гц

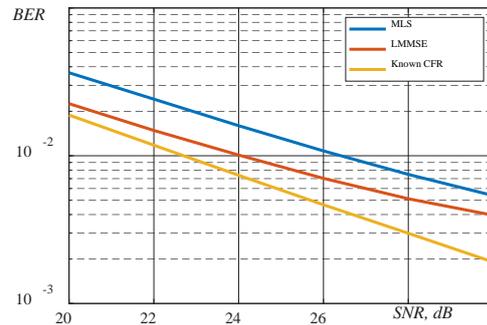


Рис. 7. Частотна характеристика каналу з трьома променями поширення сигналу та частотою Доплера 10 Гц

З рис. 6 випливає, що метод LMMSE демонструє вищу точність оцінювання середньо квадратичної похибки у порівнянні з методом MLS. З рис. 7 випливає, що метод LMMSE показує виграв до 2 дБ у порівнянні з методом MLS, проте варто зазначити, що обчислювальна складність LMMSE є на порядок вищою. Отже, з результатів моделювання роботи методів LMMSE та MLS випливає, що актуальною є задача удосконалення методу MLS, оскільки це може дати покращення результатів оцінювання параметрів каналу без суттєвого збільшення обчислювальної складності.

### Висновки

В роботі проаналізовано методи оцінювання імпульсної характеристики каналу в системах зв'язку з технологією OFDM. Розглянуто методи MLS та LMMSE. Аналіз методів проведено на модельному прикладі шляхом статистичного моделювання. Канал зв'язку описувався за моделлю Релея. Метод MLS простий в реалізації, не потребує додаткової інформації про канал, проте демонструє гіршу точність оцінювання у порівнянні з методом LMMSE. Метод LMMSE показує виграв до 2 дБ в у порівнянні з методом MLS, проте має на порядок вищу обчислювальну складність, а також потребує знання автоковаріаційної матриці каналу. Перспективними подальшими напрямками досліджень може бути удосконалення методу MLS під визначені умови роботи системи зв'язку.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Tzi-Dar Chiueh, Pei-Yun Tsai, and I-Wei Lai, *Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications*, 2nd ed. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
- [2] X. Fan, J. Yang and W. Zhang, "Time-Frequency Synchronization Design of OFDM Systems Based on CAZAC Sequence," *2020 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2020, pp. 55-58, <https://doi.org/10.1109/CISCE50729.2020.00017>.
- [3] V. Kotlyarov, O. Myronchuk, and O. Shpylka, "Mathematical description and formalization types of distortion in a digital communication channel with OFDM-signals," *Visnyk NTUU KPI, Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannya*, no. 66, pp. 10-18, 2016. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.66.10-18>.
- [4] T. A. Kumar, and L. Anjaneyulu, "Channel Estimation Techniques for Multicarrier OFDM 5G Wireless Communication Systems," *2020 IEEE 10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Shah Alam, Malaysia, 2020, pp. 98-101, <https://doi.org/10.1109/ICSET51301.2020.9265353>.
- [5] J. Guerreiro, R. Dinis, P. Montezuma, and M. Campos, "On the Receiver Design for Nonlinear NOMA-OFDM Systems," *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, 2020, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129559>.
- [6] A. Moussa, M. Poulouen, M. Frikel, S. Bedoui, K. Abderrahim, and M. M'Saad, "An Overview of blind Equalization Algorithms for Digital Communications," *19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, Sousse, Tunisia. 2019, pp. 491-496. <https://doi.org/10.1109/STA.2019.8717267>.
- [7] O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk, and Y. Myronchuk, "Two-Stage Methods for Channel Frequency Response Estimation in OFDM Communication Systems Based on Pilots from Current Received Symbol," *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 500-505 <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927031>.

- [8] X. Lv, Y. Li, Y. Wu, and H. Liang, "Kalman Filter Based Recursive Estimation of Slowly Fading Sparse Channel in Impulsive Noise Environment for OFDM Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 3, pp. 2828-2835, March 2020, <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2965005>.
- [9] S. Y. Zhuk, T. V. Malenchuk, O. S. Neumin, and O. Yu. Myronchuk, "Adaptive Radar Tracking Algorithm for Maneuverable UAV with Probabilistic Identification of Data Using Coordinate and Amplitude Characteristics," *Radioelectron. Commun. Syst.* no. 65, pp. 503-516, 2022. <https://doi.org/10.3103/S073527272212007X>.
- [10] Matthias Patzold, "Rayleigh and Rice Channels," *Mobile Radio Channels*, Wiley, pp. 55-94, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781119974116.ch3>.
- [11] Antonin Novak, František Rund, and Petr Honzík, "Impulse Response Measurements using MLS Technique on Nonsynchronous Devices," *Journal of the Audio Engineering Society*, no. 64 (12), pp. 978-987, 2016. [Electronic resource]. Available: [ff10.117743/jaes.2016.00504ff.ffhal-02504349f](https://doi.org/10.1177/1070551616600504).
- [12] A. Iqbal, V. Jeoti, M. Drieberg, and W. P. Wen, "A Time-Domain Channel Impulse Response Estimation Method for an OFDM Sounding System," *2019 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (IC-SIMA)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/ICSIMA47653.2019.9057303>.
- [13] Y. Shen, and E. Martinez, "Channel estimation in ofdm systems." in *Frescale Semiconductor Application Note*, 2006.
- [14] M. H. Mahmud, M. M. Hossain, A. A. Khan, S. Ahmed, M. A. Mahmud, and M. H. Islam, "Performance Analysis of OFDM, W-OFDM and F-OFDM Under Rayleigh Fading Channel for 5G Wireless Communication," *2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Thoothukudi, India, 2020, pp. 1172-1177, <https://doi.org/10.1109/ICISS49785.2020.9316134>.
- [15] D. V. Bhimsing, and A. C. Bhagali, "Performance of channel estimation and equalization in OFDM system," *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Chennai, India, 2017, pp. 1003-1005, <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8391861>.

Рекомендована кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.08.2025

**Мирончук Олександр Юрійович** — д-р філософії, доцент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: myronchukalex@gmail.com ;

**Шпилька Максим Вячеславович** — студент магістратури кафедри радіотехнічних систем, e-mail: maksshpilka13@gmail.com ;

**Цибровський Олександр Михайлович** — аспірант кафедри радіотехнічних систем, e-mail: a.tsybrovskyi@gmail.com ;

**Шпилька Олександр Олександрович** — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних систем, e-mail: shpylka@rtf.kpi.ua .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**O. Yu. Myronchuk<sup>1</sup>**  
**M. V. Shpylka<sup>1</sup>**  
**O. M. Tsybrovskyi<sup>1</sup>**  
**O. O. Shpylka<sup>1</sup>**

## **Analysis of the Methods for Channel Impulse Response Assessment in Communication Systems with OFDM Technology**

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

*Communication systems are a key tool in the development of modern society. Technological developments have led to the need for high-speed data exchange in large volumes. Therefore, improvement of the existing and creating new communication systems is an urgent task. One of the most promising technologies for the development of digital communication systems is orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). The main advantage of OFDM is its high resistance to multi-path fading. In an urban environment, where radio waves are reflected from buildings, the signal arrives at the receiver with different delays, which causes intersymbol interference (ISI). OFDM solves this problem by dividing a high-speed data stream into many slow sub streams, each of which is transmitted on a separate, narrow subcarrier frequency. Due to this, the symbols become longer than the delays caused by reflections, which minimizes the impact of ISI. In addition, OFDM provides high spectral efficiency, that is, it enables to transmit more data per unit of frequency band. This is achieved due to the orthogonality*

of subcarriers, the spectra of which overlap, but do not interfere with each other. This allows to tightly "pack" subcarriers, making the most of the available frequency range. The paper analyzes methods for estimating the impulse response of a communication channel in communication systems using OFDM technology. Assessment of communication channel parameters is an important stage in the operation of OFDM systems, since the number of errors that occur during information transmission depends on the accuracy of the assessment of channel parameters. In particular, the maximum length sequence method (MLS), which does not require a priori information about the channel, and the linear minimum mean square error method (LMMSE), for which it is necessary to know the autocovariance matrix of the channel, are considered. These methods are widely used in practice, but have their drawbacks. The analysis of the effectiveness of the methods was carried out on a model example by statistical modeling. The communication channel was described using the Rayleigh model. The analysis results showed that the MLS method is simple to implement, but demonstrates worse estimation accuracy compared to the LMMSE method. The LMMSE method shows a gain of up to 2 dB compared to the MLS method, but has an order of magnitude higher computational complexity.

**Keywords:** OFDM, digital communication, wireless communication channel, multipath propagation of signals, frequency response, impulse response, channel parameter estimation.

**Myronchuk Oleksandr Yu.** — PhD, Associate Professor of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: myronchukalex@gmail.com ;

**Shpylka Maksym V.** — Master's Student of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: maksshpilka13@gmail.com;

**Tsybrovskiy Oleksandr M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: a.tsybrovskiy@gmail.com;

**Shpylka Oleksandr O.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Radioengineering Systems, e-mail: shpylka@rtf.kpi.ua