

DOI 10.20535/2411-1031.2023.11.1.283538

УДК 621.391.81

ДМИТРО МОГИЛЕВИЧ,
ЛЮДМИЛА ПОГРЕБНЯК

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ OFDM-МІМО СИГНАЛУ У НЕСТАЦІОНАРНИХ КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЗАВМИРАННЯМИ

Однією з основних проблем у сучасних мережах безпроводового доступу є передавання та приймання сигналів в умовах багатопроменевого поширення. За рахунок неідеальної імпульсної характеристики каналу зв'язку виникають частотно-селективні завмирання переданого сигналу. Це може викликати спотворення форми сигналу і міжсимвольну інтерференцію, що може серйозно погіршити продуктивність системи зв'язку. Таким чином, підвищення завадостійкості у мережах безпроводового доступу в реальних умовах функціонування є одним із найважливіших завдань сучасних комунікаційних технологій. Ортогональне частотне мультиплексування, відоме своєю стійкістю до багатопромених завмирань та використовується для зменшення впливу міжсимвольної інтерференції. Багатоантенні системи є ключовою технологією для збільшення пропускну здатності та підвищення надійності зв'язку. Поєднання цих двох технологій у мережах безпроводового доступу дозволяють зменшити вплив негативних явищ на сигнал, що передається в складних заводових умовах. Запропоновано аналітичну модель сигналу, що передається нестационарним частотно-селективним радіоканалом у мережах безпроводового доступу з ортогональним частотним мультиплексуванням та багатоантенною системою. Представлені аналітичні вирази, які дають змогу сумісно враховувати вплив міжканальних та міжсимвольних завод (вплив багатопроменевого розповсюдження сигналу та доплерівського зсуву на переданий сигнал) на фоні флуктуаційного шуму. Врахування факторів, що впливають на сигнал, що передається дозволяє наблизити модель до реальних процесів, які мають місце в переважній більшості радіоканалів мереж безпроводового доступу.

Ключові слова: мережі безпроводового доступу, міжсимвольна інтерференція, багатоантенні системи, ортогональне частотне мультиплексування, флуктуаційний шум.

Постановка проблеми. Дослідження функціонування існуючих мереж безпроводового доступу (МБД) показало, що передачу інформації ускладнюють завади, які мають як природне, так і штучне походження. При цьому сигнал передається в умовах складної заводової обстановки, яка формується внаслідок наступних явищ [1]:

– багатопроменевого поширення, яке виникає внаслідок відбиття, розсіювання та дифракції радіохвиль під час їх взаємодії з різними об'єктами в навколишній місцевості. Якщо максимальна затримка між променями не перевищує часу тривалості одного символу, то інтерференція виникає лише в його межах. Однак, якщо затримка перевищує тривалість символу, радіоканал є частотно-селективним, і як наслідок може виникнути міжсимвольна інтерференція (Intersymbol Interference, ISI);

– ефекту Доплера, що виникає внаслідок руху абонента у просторі. Цей ефект призводить до значних змін параметрів (амплітуди та фази) прийнятого сигналу в часі. В такому випадку канал є нестационарним з швидкими замираннями сигналу;

– втрати в тракці поширення. Зниження середньої потужності сигналу в тракці поширення радіохвиль залежить від відстані між передавачем та приймачем, що характеризується втратами сигналу.

Компенсувати втрати в тракці поширення і вплив затінення можна за допомогою системи управління потужністю [2].

Більш складним завданням, що потребує обробки сигналу як на приймальній, так і на передавальній стороні є боротьба з швидкими завмираннями та багатопроблемним поширенням радіосигналу (частотно-селективними завмираннями) [3].

Перелічені явища суттєво впливають на сигнал, який передається та збільшують ймовірність символної і бітової помилок, що призводить до зниження завадостійкості МБД.

Сумісне використання технологій ортогонального частотного мультиплексування (*Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM*) та багатоантенних систем (*Multiple Input Multiple Output, MIMO*) може забезпечити необхідний рівень завадостійкості МБД [4], [5]. Технологія багатоантенних систем має два основних режими: просторове мультиплексування (*Spatial Division Multiplexing, SDM*) для збільшення пропускної спроможності та просторове блочне кодування (*Space-Time Block Codes, STBC* та *Space-Frequency Block Codes, SFBC*) для збільшення завадостійкості і підвищення ефективності передачі даних.

До переваг *OFDM* можна віднести: високу спектральну ефективність, що дозволяє підвищити швидкість передачі даних; зниження міжсимвольної інтерференції і підвищення стійкості до багатопроблемного поширення сигналу радіоканалом; просту апаратну реалізацію (базові операції реалізуються методами цифрової обробки). Проте, *OFDM* має суттєвий недолік – чутливість до ефекту Доплера [1], [3]. Порушення ортогональності піднесучих *OFDM* відбувається внаслідок зміщення частоти дискретизації, що в свою чергу викликає міжканальну інтерференцію (*Interchannel Interference, ICI*), тому використання цієї технології обмежується нестационарними каналами МБД. Сумісне використання *OFDM* з оптимальною кількістю піднесучих та *MIMO* в режимі просторового-блочного кодування може компенсувати вказаний недолік [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи оптимізації сумісного використання *MIMO-OFDM* є об'єктом інтенсивних теоретичних досліджень протягом останніх років [7]. Існуючі аналітичні моделі каналів радіозв'язку з *OFDM* [8] - [10] враховують вплив навмисних завад та дестабілізуючих факторів на сигнали, що передаються. Публікації [11] - [13] присвячені математичним моделям сигналу та фізичного рівня систем з *MIMO-OFDM*. Однак, вони не повністю відображають процеси, що відбуваються в нестационарних частотно-селективних каналах МБД.

Метою роботи є побудова аналітичної моделі сигналу, яка комплексно враховує вплив флуктуаційного шуму, міжканальних та міжсимвольних завад в системах з сумісним використанням *MIMO-OFDM* та максимально відповідає параметрам реальних сигналів і завад, які спостерігаються на вході абонентського терміналу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основна ідея *MIMO*, що інтегрована з технологією *OFDM* полягає в тому, що кожна антена багатоантенної системи передає модульований *OFDM*-символ. Формування *OFDM*-символу відбувається шляхом перетворення послідовного інформаційного потоку бінарних символів $\{\mathbf{d}_n\}$ в N паралельних потоків, кожен з яких узгоджується (в тому числі, і комплексно) з вихідним потоком, використовуючи різні види модуляції, за допомогою інверсного мультиплексування (демультіплексування) [11].

В ідеальних умовах *OFDM*-символ описується наступним виразом [12]:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{N-1} \dot{A}_m e^{j2\pi m \Delta f t}, \quad (1)$$

$$\dot{A}_m = A_m e^{j\varphi_m},$$

де \dot{A}_m – комплексний елемент сигнального сузір'я (*BPSK, QPSK, QAM* або *QAM-M*, M – розмір ансамблю сигналу); A_m – амплітуда піднесучої з частотою f_m ; φ_m – початкова фаза піднесучої з частотою f_m ; m – кількість піднесучих в *OFDM*-символі; T – тривалість *OFDM*-символу; Δf – відстань між піднесучими *OFDM*.

Враховуючи, що $t = n \frac{T}{N} = \frac{n}{N\Delta f}$ можна представити вираз (1) в дискретному вигляді:

$$s(n) = \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j2\pi m \frac{n}{N}}, \quad n = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}, \quad (2)$$

де n – номер дискретного відліку часу; N – кількість відліків на тривалості одного *OFDM*-символу T .

У частотній області спектр *OFDM*-сигналу $s(k)$:

$$s(k) = \sum_{m=0}^{N-1} s(n) e^{-j2\pi(k)n/N}, \quad k = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}, \quad (3)$$

де k – номер піднесучої.

У розгорнутому вигляді *OFDM*-сигнал $s(k)$, з урахуванням виразу (2), в частотній області можна представити:

$$s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j\varphi_k} e^{-j2\pi(m-k)\frac{n}{N}}.$$

Нестабільність опорної частоти передавача та фазові флуктуації, що вносяться середовищем поширенням радіохвиль та рухом абонентського терміналу суттєво впливають на *OFDM*-символ, що передається каналом МБД [1], [11]. При цьому, як правило, миттєві значення амплітуди сигналу, внаслідок швидких завмирань, розподілені за законом Релея, а початкова фаза має рівномірний розподіл на інтервалі $[-\pi, \pi]$.

Зсув несучої частоти призводить до того, що весь спектр прийнятого *OFDM*-сигналу зміщується на частоту рівну різниці між частотою генератора передавача та приймача. В такому випадку

$$s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j\varphi_k} e^{-j2\pi(m-k+\varepsilon)\frac{n}{N}},$$

де ε – зміщення частоти генератора передавача нормоване до Δf . При такому зміщенні несучої частоти робота системи порушується через інтерференцію між спектральними складовими.

Також критичним для *OFDM* є порушення ортогональності його спектральних складових:

$$s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j\varphi_k} e^{-j2\pi(m-k)\frac{n}{N}} e^{-j2\pi\frac{mn\alpha}{N}},$$

де α – коефіцієнт порушення ортогональності.

В часовій області при переміщенні джерела випромінювання відбувається масштабування *OFDM*-символу внаслідок впливу ефекту Доплера, тобто

$$s(t) = \sum_{m=0}^{N-1} A_m e^{j2\pi(m\Delta f + f_c)(t\zeta - \tau)},$$

де $\zeta = 1 - \frac{2v}{c}$ – коефіцієнт масштабування сигналу, при умові, що $v \ll c$; v – радіальна швидкість; $\tau = \frac{R}{c}$, де R – відстань між мобільним терміналом та базовою станцією.

Відомо, що радіоканал характеризується змінним у часі імпульсним відгуком $h(t, \tau)$ або змінною в часі передаточною функцією каналу $H(f, \tau)$, яка є перетворенням Фур'є від $h(t, \tau)$ (t – момент часу, τ – затримка поширення відбитого променя). Тоді, отриманий сигнал $r(t)$, що передається та приймається однією антеною (*single input single output, SISO*) має вигляд:

$$r(t) = h(t, \tau) \otimes s(t) + \xi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) s(t - \tau) + \xi(t),$$

де $\xi(t)$ – матриця флуктуаційних шумів.

На приймальній стороні для системи *MIMO* у загальному вигляді матриця отриманих *OFDM*-сигналів $\mathbf{r}(t)$ має вигляд:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}\mathbf{s}(t) + \boldsymbol{\xi}(t), \quad (4)$$

де

$$\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \dots \\ s_N(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

– матриця переданих *OFDM*-символів розміром $N \times 1$ (N – кількість передаючих антен);

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

– канална матриця розміру $M \times N$ (M – кількість прийомних антен). Значення коефіцієнтів h_{MN} для каналу МБД не постійне, випадково змінюються в часі внаслідок їх залежності від випадкових амплітуд і фаз [12]; $\boldsymbol{\xi}(t)$ – матриця флуктуаційних шумів.

Розмір матриці флуктуаційних шумів $\boldsymbol{\xi}(t)$ залежить від кількості антен на прийомі:

$$\boldsymbol{\xi}(t) = \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \dots \\ \xi_M(t) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Флуктуаційні шуми виникають через випадковий рух електронів внаслідок теплової активності в приймачі та мають гаусівський розподіл і рівну потужність на всіх частотних компонентах. У загальному випадку можна вважати, що на вхід приймача впливає стаціонарний адитивний білий гаусівський шум з нульовим середнім значенням. Статистичні характеристики такого шуму вважаються відомими [11].

З урахуванням виразів (5) та (6) отриманий сигнал $\mathbf{r}(t)$ без впливу флуктуаційного шуму має вигляд:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \dots \\ s_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}s_1(t) + h_{12}s_2(t) + \dots + h_{1N}s_N(t) \\ h_{21}s_1(t) + h_{22}s_2(t) + \dots + h_{2N}s_N(t) \\ \dots \\ h_{M1}s_1(t) + h_{M2}s_2(t) + \dots + h_{MN}s_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N h_{1i}s_i(t) \\ \sum_{i=1}^N h_{2i}s_i(t) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N h_{Mi}s_i(t) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Враховуючи у виразі (8) вплив флуктуаційних шумів (вираз 7) отримуємо [12]:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}\mathbf{s}(t) + \boldsymbol{\xi}(t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N h_{1i}s_i(t) \\ \sum_{i=1}^N h_{2i}s_i(t) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N h_{Mi}s_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \dots \\ \xi_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N h_{1i}s_i(t) + \xi_1(t) \\ \sum_{i=1}^N h_{2i}s_i(t) + \xi_2(t) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N h_{Mi}s_i(t) + \xi_M(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В сучасних системах радіозв'язку найчастіше використовуються системи з двома передавальними та однією приймальною антенами.

У такому випадку, вхідна послідовність попарно некорельованих елементів ансамблю модульованих сигналів $\{d_0, d_1, \dots, d_{N-1}, d_N, d_{N+1}, \dots, d_{2N-1}\}$, представляється у вигляді двох векторів

$$\mathbf{d}_1 = [d_0 \ d_1 \ \dots \ d_{N-2} \ d_{N-1}]^T,$$

$$\mathbf{d}_2 = [d_N \ d_{N+1} \ \dots \ d_{2N-2} \ d_{2N-1}]^T,$$

де N – кількість піднесучих *OFDM*; $d_i \in \{BPSK, QPSK, QAM - M\}$, $i=0,1,\dots, N-1$.

Відповідно до алгоритму Аламоуті, що реалізує просторово блочне кодування, у момент часу t антенами N_1 та N_2 передаються вектори сигналів \mathbf{d}_1 та \mathbf{d}_2 , а в момент часу $t+T$ – відповідні їм комплексно спряжені копії $-\mathbf{d}_2^*$ і \mathbf{d}_1^* . Канали між передавальними $N_i, i \in \{1, 2\}$ і приймальною M антенами є незалежними та характеризуються імпульсними характеристиками h_{11} та h_{12} .

Так, враховуючи обмеження в каналі МБД, на приймальній стороні після прямого швидкого перетворення Фур'є отримані вектори сигналів відповідно до виразу (9) в моменти часу t та $t+T$ [6]:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{H}_{11}\mathbf{d}_1 + \mathbf{H}_{12}\mathbf{d}_2 + \xi_1, \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_2 = -\mathbf{H}_{11}\mathbf{d}_2^* + \mathbf{H}_{12}\mathbf{d}_1^* + \xi_2, \quad (11)$$

де \mathbf{d}_1 та \mathbf{d}_2 – *OFDM*-символами (з захисними інтервалами, що виключають появу міжсимвольної інтерференції);

$$\mathbf{H}_{N_i M} = D(\mathbf{G}_{N_i M}),$$

де $\mathbf{H}_{N_i M}$ – діагональна канална матриця між передавальними $N_i, i \in \{1, 2\}$ і приймальною M антеною; $\mathbf{G}_{(N_i M)}$ – канална матриця з елементами, що вказують на рівень міжканальної інтерференції.

Представимо вирази (10) та (11) представимо в наступному вигляді:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{G}_{11}\mathbf{d}_1 + \mathbf{G}_{12}\mathbf{d}_2 + \xi_1, \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_2 = -\mathbf{G}_{11}\mathbf{d}_2^* + \mathbf{G}_{12}\mathbf{d}_1^* + \xi_2. \quad (13)$$

Тоді, вирази (10) та (11) з урахування (12) та (13) будуть мати наступний вигляд:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{H}_{11}\mathbf{d}_1 + \mathbf{H}_{12}\mathbf{d}_2 + \mathbf{Y}_1, \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_2 = -\mathbf{H}_{11}\mathbf{d}_2^* + \mathbf{H}_{12}\mathbf{d}_1^* + \mathbf{Y}_2, \quad (15)$$

де

$$\mathbf{Y}_1 = \xi_1 + (\mathbf{G}_{11} - \mathbf{H}_{11})\mathbf{d}_1 + (\mathbf{G}_{12} - \mathbf{H}_{12})\mathbf{d}_2,$$

$$\mathbf{Y}_2 = \xi_2 + (\mathbf{G}_{11} - \mathbf{H}_{11})(-\mathbf{d}_2^*) + (\mathbf{G}_{12} - \mathbf{H}_{12})\mathbf{d}_1^*$$

\mathbf{Y}_1 та \mathbf{Y}_2 – вектори, що складаються з флуктуаційного шуму та міжканальної інтерференції, що є наслідком доплерівського зсуву частоти.

Представлення переданого сигналу у вигляді виразів (14) та (15) надає можливість сумісно враховувати явища, що впливають на канал радіозв'язку та спрощують оцінку завадостійкості МБД.

Висновки. Таким чином, багатопроміневе поширення сигналу та доплерівський зсув частоти ускладнюють обробку сигналу при передачі і прийомі та знижують завадостійкість системи радіозв'язку. Багатоантенні системи забезпечують значне покращення пропускної здатності та швидкості передачі даних без будь-якого збільшення пропускної здатності та потужності передачі, тоді як ортогональне частотне мультиплексування є ефективним методом у боротьбі з міжсимвольними завадами при багатопроміневому поширенні сигналу. Ефективність використання *MIMO-OFDM* безпосередньо залежить від рівнів нестационарності каналу, що може викликати міжканальну інтерференцію, та частотної селективності, де має місце міжсимвольна інтерференція.

Запропонована аналітична модель сигналу в системах з сумісним використанням *MIMO-OFDM*, яка комплексно враховує вплив флуктуаційного шуму, міжканальних та міжсимвольних завад, що дозволяє наблизити її до реальних процесів, які мають місце в переважній більшості каналів мереж безпроводового доступу.

Напрямом подальших досліджень є застосування запропонованої моделі для удосконалення методів просторового блочного кодування сигналів для підвищення завадостійкості в системах з сумісним використанням *MIMO-OFDM*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Y. Wu, C. Xiao, Z. Ding, X. Gao, and S. Jin, “A survey on MIMO transmission with finite input signals: technical challenges, advances, and future trends”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 10(106), pp. 1779-1833, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2848363>.
- [2] C. N. Muoghalu, P. N. Achebe, and F. A. Aigbodioh, “MIMO-OFDM techniques for wireless communication system: performance evaluation review”, *International journal of advanced networking and applications*, vol.14, pp. 5572-5581, doi: <https://doi.org/10.35444/IJANA.2023.14410>.
- [3] H. S. Hussein, M. Elsayed, U. S. Mohamed, H. Esmail, and E. M. Mohamed, “Spectral efficient spatial modulation techniques”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1454-1469, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885826>.
- [4] M. Marey, and H. Mostafa, “Second-order statistics for STBC classification over amplify-and-forward cooperative systems”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21900-21911, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251219>.
- [5] L. Imoize, A. Ibhaze, A. Atayero, and K. V. N. Kavitha, “Standard propagation channel models for MIMO communication systems”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, p. 36, 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/8838792>.
- [6] H. Kaur, M. Khosla, and R. K. Sarin, “Hybrid channel estimation for MIMO relay systems with Doppler offset influences”, *Int J Commun Syst.* pp. 154-169, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.3469>.
- [7] P. Srinu, R. K. Padma, and S. N. Bala, “Capacity and BER performance improvement in integrated MIMO-OFDM system using optimal power allocation, channel estimation, and turbo coding”, *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, iss. 14, pp. 263-281, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.4915>.
- [8] T. Chawla, and A. Kansal, “Intercarrier interference analysis for massive MIMO fractional Fourier transform-OFDM systems over time-varying channels”, *International Journal of Communication Systems*, vol. 33, iss. 16, pp. 323–341, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.4586>.
- [9] P. Prajit, R. Bappaditya, and A. K. Bhattacharjee, “A novel Block Bi-diagonalization based pre-coding scheme for bit error reduction in mutiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing”, *Journal of Communication Systems*, vol. 36, iss. 8, pp. 163–182, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.5469>.
- [10] X. Li, H. Wang, N. Guan, and W. Lai, “A dual-mode index modulation scheme with Gray-coded pairwise index mapping”, *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 8, 2018. pp. 1580-1583, doi: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2838582>.
- [11] H. Singh, G. K. Soni, P. Suryawanshi, and G. Shankar, “Performance analysis and BER comparison of OFDM system for 4×4 MIMO fading channel in different modulation scheme”, in *Proc. 3d International conference on smart systems and inventive technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2020, pp. 255-259, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSSIT48917.2020.9214119>.
- [12] L. Amhaimar, and A. E. Yaakoubi, “PAPR reduction of multi-antenna systems (MIMO-OFDM) using probabilistic algorithms”, in *Proc. The 16th International conference interdisciplinarity in engineering*, Târgu Mureș, Romania, 2022, pp.815-827, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4_66.
- [13] T. Huynh-The, T.-V. Nguyen, Q.-V. Pham, D. B. Da Costa, and D.-S. Kim, “MIMO-OFDM modulation classification using three-dimensional convolutional network”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 6, 2023, pp. 6738-6743, doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3159254>.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2023.

REFERENCE

- [1] Y. Wu, C. Xiao, Z. Ding, X. Gao, and S. Jin, "A survey on MIMO transmission with finite input signals: technical challenges, advances, and future trends", *Proceedings of the IEEE*, vol. 10(106), pp. 1779-1833, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2848363>.
- [2] C. N. Muoghalu, P. N. Achebe, and F. A. Aigbodioh, "MIMO-OFDM techniques for wireless communication system: performance evaluation review", *International journal of advanced networking and applications*, vol.14, pp. 5572-5581, doi: <https://doi.org/10.35444/IJANA.2023.14410>.
- [3] H. S. Hussein, M. Elsayed, U. S. Mohamed, H. Esmail, and E. M. Mohamed, "Spectral efficient spatial modulation techniques", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1454-1469, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885826>.
- [4] M. Marey, and H. Mostafa, "Second-order statistics for STBC classification over amplify-and-forward cooperative systems", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21900-21911, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3251219>.
- [5] L. Imoize, A. Ibhaze, A. Atayero, and K. V. N. Kavitha, "Standard propagation channel models for MIMO communication systems", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, p. 36, 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/8838792>.
- [6] H. Kaur, M. Khosla, and R. K. Sarin, "Hybrid channel estimation for MIMO relay systems with Doppler offset influences", *Int J Commun Syst.* pp. 154-169, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.3469>.
- [7] P. Srinu, R. K. Padma, and S. N. Bala, "Capacity and BER performance improvement in integrated MIMO-OFDM system using optimal power allocation, channel estimation, and turbo coding", *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, iss. 14, pp. 263-281, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.4915>.
- [8] T. Chawla, and A. Kansal, "Intercarrier interference analysis for massive MIMO fractional Fourier transform-OFDM systems over time-varying channels", *International Journal of Communication Systems*, vol. 33, iss. 16, pp. 323-341, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.4586>.
- [9] P. Prajit, R. Bappaditya, and A. K. Bhattacharjee, "A novel Block Bi-diagonalization based pre-coding scheme for bit error reduction in mutiple input multiple output-orthogonal frequency division multiplexing", *Journal of Communication Systems*, vol. 36, iss. 8, pp. 163-182, 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.5469>.
- [10] X. Li, H. Wang, N. Guan, and W. Lai, "A dual-mode index modulation scheme with Gray-coded pairwise index mapping", *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 8, 2018. pp. 1580-1583, doi: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2838582>.
- [11] H. Singh, G. K. Soni, P. Suryawanshi, and G. Shankar, "Performance analysis and BER comparison of OFDM system for 4x4 MIMO fading channel in different modulation scheme", in *Proc. 3d International conference on smart systems and inventive technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2020, pp. 255-259, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSSIT48917.2020.9214119>.
- [12] L. Amhaimar, and A. E. Yaakoubi, "PAPR reduction of multi-antenna systems (MIMO-OFDM) using probabilistic algorithms", in *Proc. The 16th International conference interdisciplinarity in engineering*, Târgu Mureş, Romania, 2022, pp.815-827, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4_66.
- [13] T. Huynh-The, T.-V. Nguyen, Q.-V. Pham, D. B. Da Costa, and D.-S. Kim, "MIMO-OFDM modulation classification using three-dimensional convolutional network", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 6, 2023, pp. 6738-6743, doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3159254>.

DMYTRO MOGYLEVYCH,
LYUDMILA POGREBNIAK

ANALYTICAL MODEL OF DM-MIMO SIGNAL IN A RADIO CHANNEL WITH FREQUENCY-TIME SELECTIVE FADING

One of the main problems in modern wireless electronic communication networks is the transmission and reception of signals in multipath propagation. Due to the imperfect impulse response of the communication channel, frequency-selective fading of the transmitted signal occurs. This can cause waveform distortion and inter-symbol interference, which can seriously degrade the performance of the communication system. Thus, increasing the noise immunity of wireless electronic communication networks in real-world conditions is one of the most important tasks of modern communication technologies. Orthogonal frequency division multiplexing is known for its resistance to multipath fading and is used to reduce the impact of inter-symbol interference. Multi-antenna systems are a key technology for increasing bandwidth and improving communication reliability. The combination of these two technologies in wireless electronic communication networks can reduce the impact of negative phenomena on the transmitted signal in difficult interference conditions. An analytical model of the signal transmitted by a nonstationary frequency-selective radio channel in a wireless electronic communication network with orthogonal frequency multiplexing and a multi-antenna system is proposed. Analytical expressions are presented that allow us to jointly take into account the influence of interchannel and inter-symbol interference (the effect of multipath signal propagation and Doppler shift on the transmitted signal) against the background of fluctuating noise. Taking into account the factors affecting the transmitted signal makes it possible to bring the model closer to the real processes that occur in the vast majority of radio channels of wireless electronic communication networks.

Keywords: wireless electronic communication networks, inter-symbol interference, multi-antenna systems, orthogonal frequency multiplexing, fluctuation noise.

Могилевич Дмитро Ісакович, доктор технічних наук, професор, завідувач Спеціальної кафедри № 3, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-4323-0709, mogilev11@ukr.net.

Погребняк Людмила Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна, ORCID 0000-0002-9104-7781, pogrebniaklm@gmail.com.

Mogylevych Dmytro, doctor of technical science, professor, chief of the Special department No. 3, Institute of special communication and information security National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Pogrebniak Liudmyla, candidate of technical sciences, associate professor of telecommunication system and network department, Kruty Heroes military institute of telecommunications and information technologies, Kyiv, Ukraine.