

DOI: 10.18372/2310-5461.56.17125

УДК 004.622: 517.927

В. В. Козловський, д-р техн. наук, проф.
НТУУ “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
orcid.org/0000-0002-9560-5416
e-mail: vvkzeos@gmail.com;

А. С. Савченко, д-р техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-8205-8852
e-mail: alina@inet.ua;

О. В. Толстікова, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7616-2757
e-mail: ovtolst21@gmail.com;

Л. П. Клобукова, PhD
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-3459-1520
e-mail: brain38a@gmail.com

КРИТЕРІЙ ВИБОРУ СПЕКТРАЛЬНО-ЕФЕКТИВНИХ СИГНАЛІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Вступ

В останні роки безпроводові мережі (БПМ) передачі даних стали одним із головних напрямків розвитку мережної індустрії. Безпроводові локальні мережі можна розглядати як розширення безпроводової мережі з безпроводовим зв'язком «останньої милі» для підключення великої кількості мобільних терміналів. Перевагою безпроводових локальних мереж є порівняльна простота реалізації: не потрібні кабелі, топологія БПМ може динамічно змінюватися разом із підключенням, переміщенням і відключенням мобільних користувачів без особливих втрат часу.

Успіх безпроводових мереж значною мірою залежить від розробки мережних продуктів для множинного доступу до безпроводового середовища та відповідних стандартів. Одним із таких стандартів є протокол IEEE 802.11, що стосується специфікацій на рівнях MAC і PHY для безпроводових мереж.

Надзвичайно актуальним є впровадження сучасних безпроводових технологій у промисловому та сільськогосподарському виробництві. При впровадженні безпроводових технологій у цих галузях слід враховувати специфіку побудови таких систем та особливі вимоги, визначені стандартами, а саме:

– традиційні мережі виробничого призначення підтримують три рівні моделі ISO-OSI:

фізичний, передачі даних (канальний) та прикладний. При цьому для таких мереж немає єдиного стандарту: різні мережі працюють за своїми протоколами верхнього рівня;

– пред'являються спеціальні вимоги до надійності передачі на фізичному і канальному рівнях моделі OSI;

– при введенні нового комплексу послуг (голос, відео, дані) пріоритет з якості обслуговування (QoS), як правило, віддається даним.

При виборі безпроводової, в тому числі, сенсорної технології для мереж виробничого застосування необхідно також враховувати:

– інтенсивність обміну даними на польовому рівні;

– можливість використання автономних джерел електроживлення різної ємності;

– топологію побудови радіомережі. Необхідно забезпечити надмірність зв'язків, також можливість самоорганізації мережі. Це підвищить надійність радіомережі, а також спростить введення в дію кінцевих об'єктів (безпроводових датчиків та виконавчих механізмів).

Ідея відмови від проводів є дуже привабливою. Можуть бути вирішені проблеми, пов'язані з заміною частини проведення вже впроваджених промислових мереж. Мережні вузли та кабелі можуть повільно руйнуватися, особливо в агресивних хімічних середовищах. Відновлення проводової мережної інфраструктури вельми трудо-

містке і потребує великих фінансових витрат.

Перераховані чинники технічного та економічного характеру, безумовно, важливі, але звернемо увагу, що основні стандарти безпроводових мереж, перш за все, стосуються специфікацій фізичного рівня та у деякій мірі підрівнів MAC і РНУ рівня передачі даних (канального рівня). Тому при розробці та проектуванні БПМ основна увага приділяється вдосконаленню теоретичних методів синтезу та аналізу радіосигналів як матеріальних носіїв інформації, що переносяться у вільному середовищі. У статті, що пропонується до розгляду, зроблена спроба торкнутися найбільш актуальних, на наш погляд, проблем, які неминуче виникають у безпроводових мережах: спектральної ефективності сигналів, завадозахисності та електромагнітної сумісності.

Аналіз досліджень та публікацій

Як показано у роботі [1], технологія мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) є цифровою схемою модуляції з використанням близько розташованих піднесучих. Спосіб модуляції обирається за міркуваннями збереження порівняльно низької символної швидкості окремої піднесучої при високій загальній швидкості передачі даних.

Взагалі, технологія OFDM є вельми популярною та корисною для безпроводових мереж. Опису OFDM присвячено велику кількість монографій [1–4] та статей [5–15]. Але практично в усіх доступних нам джерелах лише констатується факт використання OFDM без глибокого аналізу його характеристик, достоїнств та недоліків, обумовлених специфікою ортогонального мультиплексування. Наприклад, у роботах [1–3, 5–9] повторюються загальні відомості про технологію OFDM та використання методів цифрової обробки сигналів, зокрема, прямого та зворотного перетворень Фур'є для фільтрації сигналів окремих піднесучих. У роботах [10–13] розглядаються компроміси між енергетичною та спектральною ефективністю OFDM-сигналів. При цьому поняття енергетичної ефективності трактується з позицій енергозбереження (так званої «зеленої» енергетики), а під спектральною ефективністю розуміється характеристика, яка суперечить енергетичній ефективності й спонукає до вибору певного компромісу. Відповідно тому в роботах [13, 14] розглядається задача багатокритеріальної оптимізації енергетичної та спектральної ефективності.

Стан проблеми та постановка задачі

Практично в усіх згаданих роботах енергетична та спектральна ефективність сигналу проиставляються одне одному. При цьому у рекомендаціях Міжнародної спілки електро-зв'язку [8] чітко вказується, що порівнювати коефіцієнт використання спектру, ефективність використання спектру та відносну спектральну ефективність для різних радіосистем просто марно. Крім того, відмічається, що, хоча спектральна ефективність являється важливим чинником, оскільки від неї залежить кількість радіо-служб, які можуть працювати водночас, вона не може бути єдиним чинником, який підлягає розгляду. Треба враховувати також вартість, доступність та сумісність обладнання, надійність та інші техніко-експлуатаційні характеристики.

Враховуючи результати вивчення літературних джерел за темою дослідження, викладемо наступні міркування.

1. Твердження, що довжина сигналу та ширина його спектру пов'язані зворотно пропорційною залежністю, впливає безпосередньо з властивостей перетворення Фур'є. Воно є уповні очевидним. Менш очевидними є самі поняття довжини та ширини спектру сигналу. В інженерній практиці застосовуються різні визначення, вибір яких залежить, перш за все, від швидкості убування спектральної щільності [4]. Загальноприйняте визначення енергетичного критерію базується на ширині смуги частот, у якій міститься певна доля повної енергії сигналу, та оцінці протяжності залишків спектру поза даною смугою. Нарешті, основоположне значення має розподіл енергії сигналу по часу та частоті.

2. При підсумовуванні ряду Фур'є, яким описується OFDM-сигнал, не треба забувати, що ряд Фур'є неперервної функції, строго кажучи, не зобов'язаний збігатися. Значить, функцію OFDM-сигналу неможливо отримати безпосереднім підсумовуванням ряду Фур'є. Однак цю проблему можна розв'язати методом Фейєра підсумовування середніх арифметичних [16, 17].

Таким чином, використовуючи метод Фейєра, можна, по-перше, знайти частинні суми довільної сигнальної функції, а по-друге (і це значно важливіше), аргументовано провести порівняльний аналіз різних сигнальних функцій по критеріям спектральної та енергетичної ефективності. Виконання цих завдань і складає мету статті, яка представляється.

Використання методу Фейєра підсумовування та відновлення сигнальної функції за її рядом Фур'є

Розглянемо деяку 2π -періодичну неперервну функцію $f_p(t)$, яка може бути єдиним образом розкладена у ряд Фур'є:

$$f_p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt). \quad (1)$$

Нехай існує послідовність частинних сум Σ_k ($k=1,2,\dots,K$, $K < \infty$) ряду Фур'є функції $f_p(t)$:

$$\Sigma_k(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^k (a_m \cos mt + b_m \sin mt).$$

Розрахуємо середньоарифметичне частинних сум Σ_k :

$$\Sigma_K(x) = \frac{\Sigma_0(x) + \Sigma_1(x) + \dots + \Sigma_{K-1}(x)}{K}. \quad (2)$$

Вирази виду (2) для довільного K називають сумами Фейєра функції $f_p(t)$. Згідно з теоремою Фейєра суми Фейєра 2π -періодичної неперервної функції $f_p(t)$ збігаються до $f_p(t)$ рівномірно на всій числовій вісі.

Теорему Фейєра можна розглядати як посилення теорему Вейєрштраса про апроксимацію неперервних функцій тригонометричними поліномами. Теоремою Вейєрштраса встановлюється лише факт того, що будь-яка неперервна функція є рівномірний ліміт деякої послідовності тригонометричних поліномів, а теорема Фейєра визначає уповні конкретну послідовність, яка має цю властивість – послідовність сум Фейєра (2).

Згідно з теоремою Фейєра у точці неперервності t_0 функції $f_p(t)$ її ряд Фур'є, який підсумовується по Фейєру, рівномірно збігається до $f_p(t_0)$. Якщо ж у точці t_g існує розрив першого роду, то ряд Фур'є збігається до

$$f_p(t_g) = \frac{f_p(t_g + \varepsilon) + f_p(t_g - \varepsilon)}{2},$$

де ε – мала околиця точки t_g .

Оскільки при цьому рівномірна збіжність ряду Фур'є вже не гарантується, результат Фейєра був посилений Лебегом, який показав, що для будь-якої функції, що підсумовується, її ряд Фур'є збігається до $f_p(t)$ майже усюди.

Тут треба відмітити, що число розривів OFDM-сигналу як 2π -періодичної функції $f_p(t)$ завжди є скінченим, тому звісна «множина міри нуль», із-за якої й виникає додаток «майже всюди», в інженерній практиці не зустрічається.

Що ж стосується практичного використання результатів теореми Фейєра, представимо частинну суму Σ_k у вигляді інтегралу

$$\Sigma_k(t) = \frac{1}{2\pi k} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{\sin k \frac{\tau}{2}}{\sin \frac{\tau}{2}} \right)^2 f(t+\tau) d\tau, \quad (3)$$

який називається інтегралом Фейєра. Ядро цього інтегралу

$$\Phi_k(t) = \frac{1}{2\pi k} \left(\frac{\sin k \frac{\tau}{2}}{\sin \frac{\tau}{2}} \right)^2, \quad (4)$$

відповідно, називається ядром Фейєра.

З урахуванням (4) вираз (3) запишемо у наступному вигляді:

$$\Sigma_k(t) = \frac{1}{2\pi k} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{\sin k \frac{\tau}{2}}{\sin \frac{\tau}{2}} \right)^2 f(t+\tau) d\tau, \quad (5)$$

що, по суті, представляє собою інтеграл згортки досліджуваної функції з ядром.

Наведені результати використані для дослідження OFDM-сигналу. На рис. 1 зображені графіки розкладання OFDM-сигналу з п'ятьма піднесучими в ряд Фур'є, який обмежений п'ятьма членами. Умова ортогональності не дотримується: бічні пелюстки парціальних спектрів перетинаються у точках, де їх значення є довільними та не дорівнюють нулю.

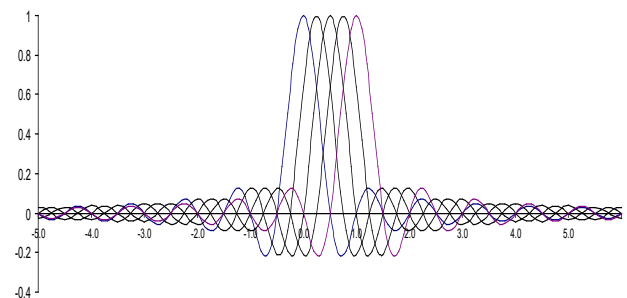


Рис. 1. Графіки п'яти піднесучих OFDM-сигналу

При прямому підсумовуванні п'яти членів ряду ми отримали результуючий графік сигналу, який зображений на рис. 2.

Для отримання порівняльних результатів підсумовування за методом середньо-арифметичних досліджено ядро Фейєра.

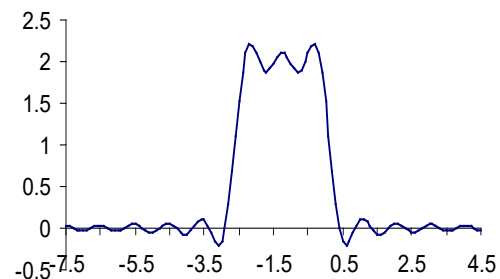


Рис. 2. Графік сумарного сигналу

За формулою (4) розрахований графік ядра Фейєра для випадку $k=1$. Графік зображений на рис. 3. Можна бачити, що отримана функція у деякій мірі нагадує графік гаусівського або cos-квадратного імпульсу.

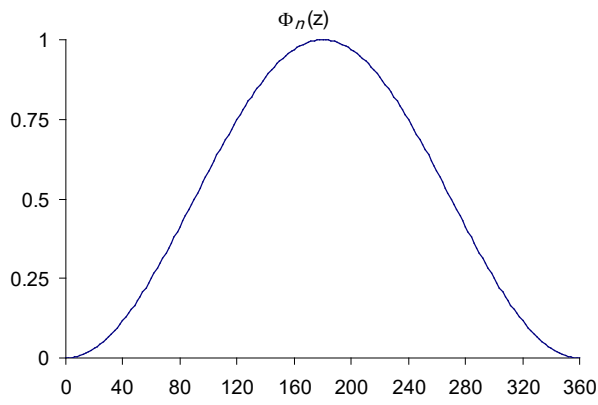


Рис. 3. Графік ядра Фейєра; $k = 1$

Параметри реального ядра Фейєра треба узгодити з параметрами вибраного OFDM-сигналу. Графік відповідного ядра зображений на рис. 4.

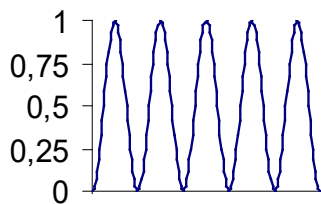


Рис. 4. Графік ядра Фейєра; $k = 5$

З використанням виразу (5) було знов розраховано графіки розкладання OFDM-сигналу з п'ятьма неортогональними піднесучими (рис. 5) та графік сумарного сигналу зі згладжуванням по Фейєру (рис. 6).

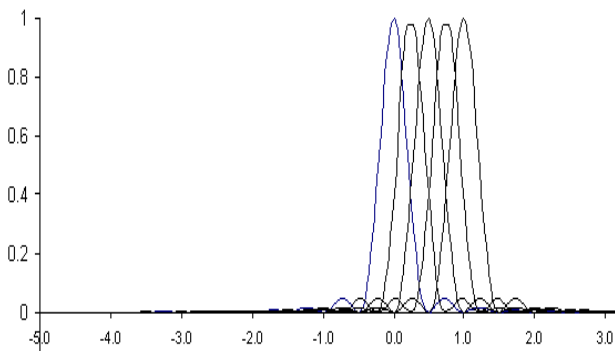


Рис. 5. Графіки п'яти піднесучих OFDM-сигналу зі згладжуючим ядром Фейєра

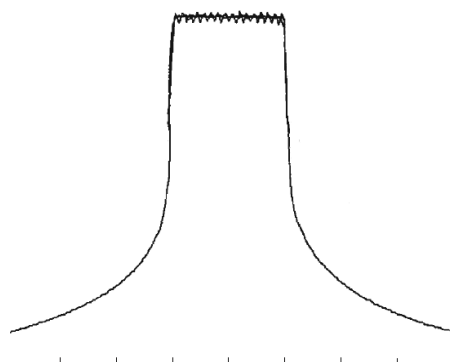


Рис. 6. Графік сумарного сигналу зі згладжуючим ядром Фейєра

З рис. 5 та рис. 6 видно, що при використанні згладжуючого ядра Фейєра рівень бічних пелюсток піднесучих значно знижується. Відповідно, відновлений сумарний сигнал набуває в околиці плоскої частини імпульсу форми, більш близької до прямокутної. Фронт та зріз імпульсу втрачають коливальний характер, стають монотонними, при цьому, що уповні логічно, сумарний сигнал на низькому рівні бічних пелюсток розширяється.

Таким чином, можна зробити висновок, що спектральна ефективність сигналу в цілому покращується. Для отримання порівняльних кількісних оцінок треба провести додаткові дослідження, але вже зараз стає ясным, що за критерієм оптимального частотно-часового розподілу енергії сигналу суперечностей між енергетичною та спектральною ефективністю не спостерігається.

Висновки

1. В останні роки безпроводові мережі (БПМ) передачі даних стали одним із головних напрямків розвитку мережної індустрії завдяки порівняльній простоті реалізації та обслуговування: не потрібні кабелі, топологія БПМ може динамічно змінюватися разом із підключенням, переміщенням і відключенням мобільних користувачів без особливих втрат часу.

2. Тим не менш, успіх безпроводових мереж супроводжується новими викликами, у першу чергу, об'єктивною обмеженістю частотного ресурсу. У зв'язку з цим існує проблема забезпечення максимально доступної спектральної ефективності сигналів, які переносять інформацію у каналах обміну. Показано, що при розкладанні довільного сигналу у ряд Фур'є відновлення сигналу можна достатньо успішно забезпечити шляхом застосування методу Фейєра підсумовування середніх арифметичних частинних сум ряду.

3. Крім того, у представленій статті доведено, що ядро Фейєра може служити інструментом згладжування форми сигналу. Відповідно, забезпечується потрібна спектральна ефективність сигналу, і, як наслідок, найбільш повне використання частотного ресурсу (який завжди обмежений, особливо у безпроводових мережах). Більш того, завдяки використанню згладжуючих ядер Фейєра у певній мірі усуваються суперечності між енергетичною та спектральною ефективністю сигналів.

4. У подальшому планується, базуючись на загальній теорії сигналів, зокрема, функцій невизначеності, провести окремі дослідження та порівняльний аналіз сигналів, найбільш придатних для застосування у безпроводових мережах.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Asplund H., Astely D., Butovitsch P., Chapman T., Frenne M., Ghasemzadeh F., Hagstrom M., Hogan B.,

- Jongren G., Karlsson J., Kronstedt F., Larsson E. *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments Bridging the Gap Between Theory and Practice*. Academic Press, 125 London Wall, London EC2Y 5AS, United Kingdom, 2020. – 740 p.
- [2] Miaowen Wen, Qiang Li, Xiang Cheng *Index Modulation for OFDM Communications Systems* 1st ed. Springer, 2021. – 186 p.
- [3] Adarsh B. Narasimhamurthy A. *OFDM Systems for Wireless Communications* 2010. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-01513-7> (access data 14/11/2022)
- [4] Suhash Chandra Dutta Roy. *Circuits, Systems and Signal Processing*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. 344 p.
- [5] Agajo J., Isaac O. and other *Dynamic Approach to Enhance Performance of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) In a Wireless Communication Network*. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 2, No. 2, February 2011, p. 58–68.
- [6] Ballal B., Ballal R. and other *Orthogonal Frequency Division Multiplexing and its Applications*. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2013. Vol. 2, Issue 1. India Online ISSN: 2319-7064, p. 325–328.
- [7] Lian J. and other *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Techniques Comparison for Underwater Optical Wireless Communication Systems*. *Sensors* 2019, 19, 160; doi:10.3390/s19010160. – 19 p.
- [8] Recommendation ITU-R SM.1046-3 (09/2017). *Definition of spectrum use and efficiency of a radio system SM Series Spectrum management*. Geneva, ITU, 2017. – 55 p.
- [9] Nguyen X.H. and other *User Spectral Efficiency: Combining Spectral Efficiency with User Experience*. *IEEE ICC 2016 – Communication QoS, Reliability and Modeling Symposium*, (23–27 May 2016, Kuala Lumpur, Malaysia). – 5 p. URL: <http://icc2016.ieee-icc.org> (access data 14/11/2022)
- [10] Ngo H.Q. and oth. *Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems*. *IEEE Transactions on Communications*, 2013. Vol. 61, No. 4, p. 1436–1449.
- [11] Li Zh., Huilin J. and oth. *Energy spectral efficiency tradeoff in downlink OFDMA network*. *Interneshenel Jornal Communication System*. 2014. – 12 p. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/dac.2725
- [12] Khalili A., Wing Kwan D., Khalili A. *Energy and Spectral Efficiency Tradeoff in OFDMA Networks via Antenna Selection Strategy*. *2020 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, (25–28 May 2020, Seoul, Korea) (South). – 6 p.
- [13] Amin O., Bedeer E., Ahmed M. H., & Dobre O. A. *Energy efficiency and spectral efficiency trade-off for OFDM systems with imperfect channel estimation*. *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2014. p. 3553–3558. doi:10.1109/icc.2014.6883872
- [14] Amin O., Bedeer E., Ahmed M. H., Dobre O. A. *Energy Efficiency–Spectral Efficiency Tradeoff: A Multiobjective Optimization Approach*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016. 65(4), 1975–1981. – 6 p. doi:10.1109/tvt.2015.2425934
- [15] Song Zh. and oth. *On the Spectral-Energy Efficiency and Rate Fairness Tradeoff in Relay-Aided Cooperative OFDMA Systems*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2016. Vol. 15, No. 9, p.6342–6355.
- [16] Kohlenbach U. and oth. *Quantitative results on Fejer monotone sequences*. *Communications in Contemporary Mathematics*, 2018. 39 p. URL: DOI: 10.1142/S0219199717500158
- [17] Tuladhar B.M., Carvajal-Gamez B., Lypez-Bonilla J. *Fejer’s Kernel and its Associated Polynomials*. *American-Eurasian Journal of Scientific Research*. 2019. 14 (1): 04–05, p. 4–5.

Козловський В. В., Савченко А. С., Толстікова О. В., Клобукова Л. П.
КРИТЕРІЙ ВИБОРУ СПЕКТРАЛЬНО-ЕФЕКТИВНИХ СИГНАЛІВ У БЕЗПРОВОДОВИХ ІН-
ФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Безпроводові мережі передачі даних стали одним із головних напрямків розвитку мережної індустрії завдяки простоті реалізації та обслуговування. Певною складністю є об’єктивна обмеженість частотного ресурсу. У зв’язку з цим існує проблема забезпечення максимально доступної спектральної ефективності сигналів, які переносять інформацію у каналах обміну. Показано, що при розкладанні довільного сигналу у ряд Фур’є відновлення сигналу можна достатньо успішно забезпечити шляхом застосування методу Фейєра підсумовування середніх арифметичних частинних сум ряду.

У роботі розглядається задача дослідження спектральної ефективності стосовно OFDM-сигналів зі згладжуванням. У якості функцій згладжування використовуються функції, що впливають з методу Фейєра підсумовування середніх арифметичних. Як відомо, при застосування теорема Фейєра до підсумовування рядів Фур’є гарантується рівномірна (монотонна) збіжність частинних сум ряду до функції, яка розкладається. У роботі показано, що метод не тільки є корисним для відновлення сигналів по обмеженому числу членів ряду, але ядро Фейєра грає роль інструменту забезпечення спектральної ефективності сигналів. Розрахунковим шляхом доведено, що завдяки згладжуванню з використанням ядра Фейєра форма сигналу наближається до гаусовської, яка є найбільш прийнятною для оптимального розподілу енергії сигналу за часом та частотою. У

подальшому планується, базуючись на загальній теорії сигналів, зокрема, функції невизначеності, провести окремі дослідження та порівняльний аналіз сигналів, найбільш придатних для застосування у безпроводових мережах.

Ключові слова: OFDM-сигнал, теорема Фейера, ядро Фейера, згладжування, підсумовування середніх арифметичних.

Kozlovskyi V., Savchenko A., Tolstikova O., Klobukova L.

THE CRITERIA OF CHOICE OF SPECTRAL-EFFICIENT SIGNALS IN WIRELESS INFORMATIONAL NETWORKS

Wireless data transmission networks have become one of the main areas of development of the network industry due to the ease of implementation and maintenance. A certain difficulty is the objective limitation of the frequency resource. In this regard, there is a problem of ensuring the maximum available spectral efficiency of signals that carry information in exchange channels. It is shown that when decomposing an arbitrary signal into a Fourier series, signal recovery can be ensured quite successfully by applying Fejer's method of summing the average arithmetic partial sums of the series.

The problem of research of spectral efficiency with respect to smoothed OFDM-signals is considered. The functions following Fejer's method of summing of arithmetic means are used. As we know while using Fejer's theorem for summing of Fourier series the uniform monotonic convergence of partial sums of series to expanded function is guaranteed. The article shows that Fejer's method is not just useful for restoration of signals by limited number of series members, but Fejer's kernel plays the role of the tool of providing of signal spectral efficiency. Grounding on calculations we prove that due to smoothing with Fejer's kernel aid the signal form is closer to Gaussian, which is the most acceptable for optimal distribution of signal energy by time and frequency.

In the future, based on the general theory of signals, in particular, uncertainty functions, it is planned to conduct separate studies and comparative analysis of signals most suitable for use in wireless networks.

Keywords: OFDM-signal, Fejer's theorem, Fejer's kernel, smoothing, arithmetic means summing.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2022 р.

Прийнято до друку 26.12.2022 р.