

Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.391

DOI: 10.30748/zhups.2020.66.06

С.В. Індик, В.П. Лисечко

Український державний університет залізничного транспорту, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ АНСАМБЛЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ, ОТРИМАНИХ ЗА РАХУНОК ЧАСТОТНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ З НИЗЬКОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ У ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ

В статті здійснено дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області із наступним перенесенням частотних елементів в інші смуги частот. Багатократна фільтрація базових послідовностей та повторна фільтрація отриманих сигналів дозволяє отримувати граничний об'єм ансамбля сигналів, який значно переважає існуючі ансамблі складних сигналів, що застосовуються для побудови систем радіозв'язку з кодовим розділенням каналів, в тому числі і для когнітивних радіомереж.

Ключові слова: складний сигнал, функція взаємної кореляції, завада множинного доступу, відеоімпульс, база сигналу, ширина спектру сигналу, мінімальна енергетична взаємодія, об'єм ансамблю.

Вступ

Постановка проблеми. Застосування складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області дозволяє значно збільшити об'єм ансамблю сигналів за використання частотних сегментів з рідних утворюючих послідовностей [1–2]. При цьому зберігається заданий рівень взаємної кореляції між сигналами отриманого ансамблю і, відповідно, рівень завад множинного доступу, що виникають в системах когнітивних радіомережах при виникненні частотних колізій [3–5].

Визначення об'єму ансамблів складних сигналів на основі використання смугової фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області необхідне для подальшого застосування таких сигналів в системах когнітивного радіозв'язку, в яких застосовується кодове розділення каналів. Таким чином означена задача є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі розглянуті ансамблеві властивості складних сигналів на основі лінійних та нелінійних послідовностей [4–5].

Такі сигнали широко застосовуються в системах радіозв'язку, але за умови широкого динамічного діапазону статистичні характеристики таких сигналів не можуть забезпечити захист від завад множинного доступу.

Ансамблеві властивості складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області раніше не розглядалися і тому потребують детального дослідження.

Метою статті є дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей коротких відеоімпульсів з низькою взаємодією у часовій області, а також розробка рекомендацій що до їх застосування в когнітивних системах радіозв'язку з кодовим розділенням каналів.

Виклад основного матеріалу

Дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок смугової фільтрації в частотній області псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області, отриманих за рахунок перестановки ранжованих часових інтервалів, здійснюється з використанням сигналів, які описані в [1–2].

У процесі аналізу складних сигналів в ансамблі виконується зіставлення максимальних викидів бічних пелюсток функції взаємної кореляції (ФВК) аналізованих сигналів з умови мінімальної подоби, при цьому рівень відповідності визначається згідно значення [1–2; 4–5]:

$$R_{\max} = \frac{\alpha}{\sqrt{B}}, \quad (1)$$

де $\alpha = 1 \dots 5$ – коефіцієнт;

B – база сигналу.

База сигналу розраховується як [4]:

$$B = \Delta F \cdot T, \quad (2)$$

де ΔF – ширина спектру сигналу;

T – тривалість сигналу.

Щодо псевдовипадкових послідовностей з мінімальною взаємодією на основі перестановки ранжованих часових інтервалів, які містять фіксовану кількість елементів, то їх мінімальна подоба визначається як [1]:

$$R_{\max} = \frac{1}{\sqrt{n_i n_j}}, \quad (3)$$

де $n_i n_j$ – кількість імпульсів у парі послідовностей, що піддається аналізу.

Виконання умов (1) та (3) можливе завдяки застосування складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області та перестановки частотних смуг.

При цьому, згідно проведених розрахунків, смуга фільтрації складає від 0.1% до 2% від загальної ширини основної пелюстки спектру псевдовипадкової послідовності з низькою взаємодією у часовій області з виконанням умови збереження взаємкореляційних властивостей і прийнятних для практичного застосування отриманих сигналів у когнітивних системах радіозв'язку із використанням кодового розділення каналів.

У відповідності із [4] середнє значення об'єму великої системи сигналів $L_{сер}$, при якому об'єм значно більший за базу сигналу визначається як:

$$L_{сер} = C(\alpha) \frac{n^{\alpha-1}}{[\ln(an)]^{3/2}}, \quad (4)$$

де $C(\alpha) = 3\pi^{1/2} a^{-\alpha} 2^{-2} \alpha^{3/2}$;

n – кількість імпульсів у псевдовипадкових послідовностях;

$a \approx 1.6$, виходячи з [4].

Для обчислення середнього значення об'єму великої системи сигналів було використано параметри, розраховані в [2], смуга фільтрації задається рівною 0.1% від ширини основної пелюстки спектру псевдовипадкової послідовності з мінімальною взаємодією. При цьому смуга фільтрація здійснюється з різним значенням смуг частот з подальшим переносом отриманих проміжків в загальну область частот. Оцінка кількості смуг фільтрації відбувається за рахунок коефіцієнту використання частотного спектру k_s , який визначається як:

$$k_s = \frac{\Delta F}{\Delta f}, \quad (5)$$

де ΔF – ширина основної пелюстки спектру псев-

довипадкової послідовності з низькою взаємодією в часовій області;

Δf – ширина смуги фільтрації псевдовипадкових послідовностей.

Визначено, що за основу беремо послідовності з низькою взаємодією в часовій області, отриманих за рахунок перестановки ранжованих часових інтервалів, граничний об'єм яких складає $L_{не}$.

Необхідно зауважити, що об'єм ансамблів псевдовипадкових послідовностей з мінімальною енергетичною взаємодією, які було прийнято за основу значно переважає об'єм умовної великої системи сигналів і [6].

Кількість ансамблів сигналів, які можна отримати за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області, буде визначатися значенням факторіалу кількості смуг розбиття, а саме $(m!-1)$.

Як наслідок, сумарна кількість утворених послідовностей буде визначатися виразом:

$$\begin{aligned} L_{\phi} = & L_{не} + L_{не}(a1!-1) + \\ & + L_{не}(a1!-1)(a2!-1) + \\ & + L_{не}(a1!-1)(a2!-1)(a3!-1) + \dots + \\ & + L_{не} \prod_1^m (m!-1), \end{aligned} \quad (6)$$

де $L_{не}$ – кількість послідовностей у вихідному ансамблі, на основі якого формують решту дочірніх ансамблів;

m – максимальна кількість смуг, на які розбиваються послідовності;

$a1, a2, a3$ – смуги фільтрації;

Максимальна кількість смуг частот, на які розбивається ансамбль псевдовипадкових послідовностей з мінімальною взаємодією в часовій області буде визначатися коефіцієнтом використання частотного спектру k_s .

Для моделювання було використано отримані послідовності з мінімальною енергетичною взаємодією, отримані на основі нелінійних послідовностей з кількістю відеоімпульсів $n = 100$ [6].

Об'єм вихідного ансамблю таких послідовностей $L_{меv} = 4.0 \times 10^9$ [6].

У результаті моделювання ансамблів складних сигналів, сформованих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій області на основі перестановок ранжованих часових інтервалів, було отримано граничні значення кількості утворених послідовностей та сигналів та побудовано їх залежності від ступеню перетворення – кількості часових інтервалів розбиття, яких було обрано 10 – від 1 до 10 та числа смуг фільтрації, яких також було обрано 10 – від 1 до 10, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Об'єм ансамблів отриманих послідовностей та сигналів на їх основі

m	1	2	3	4	5
$L_{нв}$	4.0×10^9	8.0×10^9	2.8×10^{10}	4.8×10^{11}	5.5×10^{13}
L_{ϕ}	1.1×10^{37}	2.1×10^{37}	7.4×10^{37}	1.3×10^{39}	1.6×10^{41}
m	6	7	8	9	10
$L_{нв}$	3.9×10^{16}	1.9×10^{20}	7.9×10^{24}	2.9×10^{30}	1.1×10^{37}
L_{ϕ}	1×10^{44}	5.2×10^{47}	2.1×10^{52}	7.6×10^{57}	2.8×10^{64}

Джерело: розроблено авторами за даними [2, С. 85; 6, С. 107].

На рис. 1 візуалізовано об'єми ансамблів вихідних нелінійних послідовностей та послідовностей з мінімальною взаємодією у часовій області в залежності від кількості перестановок.

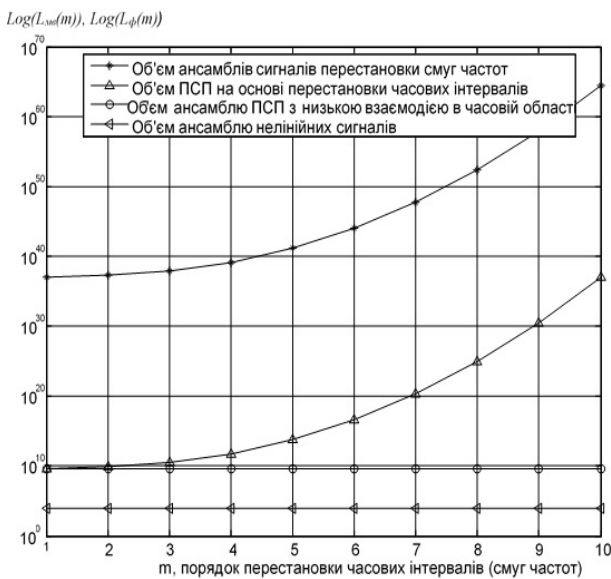


Рис. 1. Залежність кількості утворених сигналів від порядку перестановки інтервалів (числа смуг фільтрації)

Джерело: розроблено авторами за даними [2, С. 85; 6, С. 107].

З рис. 1 видно, що ансамблі послідовностей, отриманих шляхом перестановок ранжованих часових інтервалів та сигналів на їх основі, отриманих шляхом смугової фільтрації з наступною перестановкою можуть мати об'єм, що на порядки перевищує об'єм утворюючих послідовностей.

Було здійснено дослідження залежності об'єму ансамблів синтезованих сигналів від кількості імпульсів n у вихідних псевдовипадкових послідовностях при кратності перестановок в часовій та частотній областях $m = 5$. Результати розрахунку наведено в табл. 2.

Візуалізацію результатів моделювання наведено на рис. 2.

Таблиця 2

Об'єм ансамблів вихідних послідовностей та послідовностей і сигналів на їх основі

n	40	100	256	1032	2088	9000
$L_{нел}$	3.8×10^3	8×10^3	1.3×10^8	1.5×10^8	5.4×10^8	8×10^9
$L_{нев}$	1.9×10^9	4.0×10^9	7.5×10^{12}	6.5×10^{13}	2.7×10^{14}	4.0×10^{15}
$L_{нв}$	1.8×10^{16}	3.9×10^{16}	7.3×10^{19}	6.4×10^{20}	2.6×10^{21}	3.9×10^{22}
L_{ϕ}	1.8×10^{23}	3.8×10^{23}	7.2×10^{26}	6.3×10^{27}	2.6×10^{28}	3.8×10^{29}

Джерело: розроблено авторами за даними [2, С. 85; 6, С.107].

Візуалізацію результатів моделювання наведено на рис. 2.

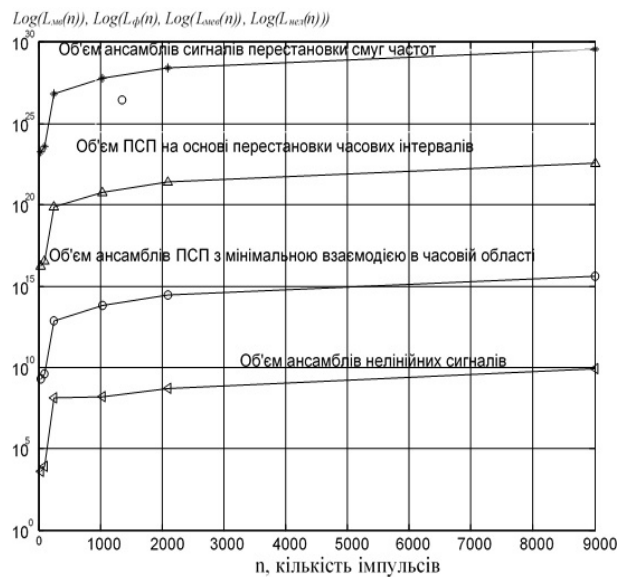


Рис. 2. Залежність кількості утворених сигналів від кількості імпульсів в послідовностях

Джерело: розроблено авторами за даними [2, С. 85; 6, С. 107].

З рис. 2 видно, що об'єм ансамблів послідовностей, отриманих шляхом перестановок ранжованих часових інтервалів та сигналів на їх основі, отриманих шляхом смугової фільтрації з наступною перестановкою, при інших однакових умовах, мають об'єм, що значно перевищує об'єм послідовностей, які є базовими.

При цьому необхідно врахувати, що для повної оцінки необхідно здійснити аналіз взаємодіяючих властивостей повного ансамблю, що дасть обмеження об'єму, що є окремим завданням.

Висновки

Висновки повинні містити стислий виклад результатів вирішення наукової проблеми (поставле-

ного завдання), що отримані в процесі аналізу обраного матеріалу, оцінки та узагальнення. Необхідно підкреслити їх самостійність, новизну, теоретичне та (або) прикладне значення, акцентувавши увагу на кількісних показниках здобутих результатів.

Звертається увага на введення до наукового обігу нових фактів, висновків, рекомендацій, закономірностей або уточнення відомих раніше, але не-

достатньо вивчених.

Вказуються відомості про достовірність та новизну результатів, що отримані у процесі проведення наукового дослідження, на основі яких встановлені нові теоретичні підходи, закономірності та визначені шляхи їх застосування для конкретних практичних потреб.

Список літератури

1. Indyk S. Method of permutation of intervals, taking into account correlation properties of segments / S. Indyk, V. Lysechko // Control, navigation and communication system. – 2020. – No. 3(61). – P. 128-130. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3>.
2. Indyk S. The study of ensemble properties of complex signals obtained by time interval permutation / S. Indyk, V. Lysechko // Advanced Information Systems. – 2020. – No. 3(4). – P. 85-88. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.11>.
3. Свергунова Ю.О. Метод квазіортогонального частотного мультиплексування на піднесених частотах / Ю.О. Свергунова, В.П. Лисечко, Д.О. Легка // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 2. – С. 75-79.
4. Sverhunova Yu. Method of determining coincidence positions subcarrier frequencies by QOFDM / Yu. Sverhunova, V. Lysechko, G. Kachurovskiy // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 3. – С. 78-81.
5. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В.П. Ипатов. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
6. Северинов А.В. Анализ ансамблевых свойств сложных сигналов / А.В. Северинов, В. П. Лысечко, А.С. Жученко // Системи обробки інформації. – 2006. – № 4. – С. 105-108.
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
9. Петрович Н.Т. Системы связи с шумоподобными сигналами / Н.Т. Петрович, М.К. Размахнин. – М.: Сов. радио, 1969. – 232 с.
10. Максимов М.В. Защита от радиопомех / М.В. Максимов. – М.: Сов. радио, 1999. – 496 с.
11. Семенихин В.С. Сухопутная подвижная радиосвязь / В.С. Семенихин, И.М. Пышкин. – М.: Радио и связь, 1990. – 432 с.
12. Arslan H. Cognitive radio, software defined radio and adaptive wireless systems / H. Arslan. – Dordrecht: Springer, 2007. – 453p. <https://doi.org/10.10079781402055423>.
13. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи / В.И. Борисов. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
14. Банкет В.Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В.Л. Банкет, В.М. Дорофеев. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.

Надійшла до редколегії 24.07.2020

Схвалена до друку 13.10.2020

Відомості про авторів:

Індик Сергій Володимирович

старший викладач
Українського державного університету
залізничного транспорту,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3124-8722>

Лисечко Володимир Петрович

кандидат технічних наук доцент
доцент
Українського державного університету
залізничного транспорту,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1520-9515>

Information about the authors:

Serhii Indyk

Senior Lecturer
of Ukrainian State University
of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3124-8722>

Volodymyr Lysechko

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer
of Ukrainian State University
of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1520-9515>

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНСАМБЛЕВЫХ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ЗА СЧЕТ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ
С НИЗКИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ**

С.В. Индык, В.П. Лысечко

В статье проведено исследование ансамблевых свойств сложных сигналов, полученных за счет частотной фильтрации псевдослучайных последовательностей с низким взаимодействием во временной области с последующим переносом частотных элементов в другие полосы частот. Многократная фильтрация базовых последовательностей и повторная фильтрация полученных сигналов позволяет получать предельный объем ансамбля сигналов, который значительно превосходит существующие ансамбли сложных сигналов, применяемые для построения систем радиосвязи с кодовым разделением каналов, в том числе и для когнитивных радиосетей.

Ключевые слова: *сложный сигнал, функция взаимной корреляции, помеха множественного доступа, видеоимпульс, база сигнала, ширина спектра сигнала, минимальная энергетическое взаимодействие, объем ансамбля.*

**THE ENSEMBLE PROPERTIES RESEARCH OF COMPLEX SIGNALS,
RECEIVED THROUGH THE BANDPASS FILTERING OF PSEUDO-RANDOM SEQUENCES
WITH LOW INTERACTION IN THE TIME DOMAIN**

S. Indyk, V. Lysechko

The ensemble properties of complex signals obtained by frequency filtering of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain on the basis of permutations of ranked time intervals with the subsequent transfer of frequency elements to other frequency bands are studied in the article. In the analysis process of the obtained complex signals in the ensemble the comparison of the maximum emissions of the side lobes of the cross-correlation function of the analyzed signals with the conditions of minimum similarity is performed, herewith the level of compliance is determined in accordance with the specified value. The set parameters were used to calculate the average value of the volume of a large signal system, namely, the filter band is set equal to 0.1% of the main lobe width of the spectrum of the pseudo-random sequence with minimal interaction. The bandpass filtering is performed with different values of the frequency bands, followed by the transfer of the obtained intervals to the common frequency domain. Estimation of the filter bands number is due to the utilization factor of the frequency spectrum. As a result of the simulation, the limit values of the formed sequences and signals volume were obtained, as well as their dependences on the degree of transformation - the number of partition time intervals and the number of filter bands. Simulation methods were used to confirm the reliability of the obtained results. The analysis of the experimental research results was performed using the methods of mathematical statistics. The simulation results show that multiple filtering of base sequences and re-filtering of the received signals with subsequent permutation of the filtered parts of the spectrum allow obtaining the limit volume of the signal ensemble, which significantly exceeds the existing complex signals ensembles used to build radio communication systems with code-division multiple access channel, including for cognitive radio networks.

Keywords: *complex signal, cross-correlation function, multiple access interference, videopulse, signal base, signal spectrum width, minimal energy interaction, ensemble volume.*