

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІНДИК СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ
ДЛЯ КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі
05 – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.В. Індик

Науковий керівник

ЛИСЕЧКО Володимир Петрович
кандидат технічних наук, доцент

*Зробити всі необхідні записи
підписати дисертацію
власною підписом
Індик Сергій Володимирович*



Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Індик С. В. Методи формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – «Телекомунікаційні системи та мережі». Український державний університет залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційне дослідження присвячене розробленню методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

Наукова новизна дисертаційної роботи обумовлена новим підходом до вирішення важливого науково-прикладного завдання, що полягає у розробленні методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

Вперше розроблено метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів за рахунок аналізу всіх можливих комбінацій частотних елементів з подальшим вибором оптимального варіанта перестановок.

Удосконалено метод формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей, який відрізняється від відомих формуванням центрованого ряду на основі середнього значення максимальних викидів бічних пелюсток функції взаємної кореляції (ФВК), застосування якого дозволяє знизити рівень завад множинного доступу і збільшити об'єм ансамбля.

Отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними

властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, реалізований на основі виділенні зі спектра послідовностей рівних смуг з наступним перенесенням до спільної області частот і подальшим застосуванням перестановок, що дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів при заданому рівні завад множинного доступу.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає:

1) у розробленні програмної реалізації методу формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, який дозволяє покращити взаємокореляційні властивості сформованих ансамблів складних сигналів порівняно з відомими ансамблями на основі послідовностей з низьким рівнем енергетичної взаємодії і зменшити рівні максимальних викидів бічних пелюсток функції взаємної кореляції на 7-12 %.

2) розробленні програмної реалізації методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів в m раз, де m – число перестановок частотних елементів.

3) розробленні програмної реалізації методу формування ансамблів складних сигналів на основі використання послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів порівняно з відомими ансамблями на 16-26 %.

Відповідно до теми дисертації опубліковано 11 наукових праць: з яких шість статей опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України (серед яких одна стаття у журналі, що індексується наукометричною базою WEB OF SCIENCE) і п'ять праць апробаційного характеру.

У вступі наведено актуальність теми дисертаційної роботи, зв'язок з науковими програмами, обґрунтовуються мета і завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено перелік результатів дисертаційного дослідження, які визначають наукову новизну, сформульовано практичну

значущість отриманих наукових результатів, відомості про реалізацію, апробацію, публікацію наукових і практичних результатів дисертації та особистий внесок автора дисертаційної роботи в наукових статтях, які виконано у співавторстві.

У першому розділі проведено аналіз взаємокореляційних властивостей складних сигналів, який показує що відомі методи боротьби з завадами множинного доступу (ЗМД) не забезпечують зниження їхнього рівня до прийняттого значення при випадковому тимчасовому зсуві. Виявлено основні фактори, які впливають на величину ЗМД та число абонентів, що обслуговуються в когнітивних телекомунікаційних системах (КТС). Обґрунтовано необхідність розробки методів формування ансамблів складних сигналів для КТС з кодовим розділенням каналів на основі псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією у часовій та частотній областях, дослідження їхніх ансамблевих та взаємокореляційних властивостей.

У другому розділі отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів в часовій області з урахуванням взаємокореляційних властивостей, який відрізняється від уже відомих розбиттям послідовностей на часові інтервали з подальшими перестановками на основі центрованого ряду. Сформовані за таким методом сигнали мають низький рівень ЗМД, який визначається значеннями максимальних викидів бічних пелюсток ФВК.

Розроблений алгоритм реалізації методу формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, який дозволяє формувати ансамблі складних сигналів на основі послідовностей з мінімальною енергетичною взаємодією було реалізовано як програмний продукт у середовищі Matlab.

Результати проведеного дослідження взаємокореляційних властивостей сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду показують, що вони задовольняють умову мінімальної подоби і мають кращі, відносно відомих сигналів, взаємокореляційні властивості. Результати, отримані на основі проведених досліджень ансамблевих властивостей сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів

послідовностей на основі центрованого ряду доводять, що вони мають значно більший об'єм ансамблів, ніж ансамблі відомих сигналів, що застосовуються в КТС з кодовим розділенням каналів. Застосування утворених ансамблів складних сигналів із збільшеним об'ємом дозволить збільшити кількість одночасно обслуговуваних абонентів при низьких рівнях ЗМД.

У третьому розділі розроблено метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору. Сигнали, утворені за таким методом, мають низький рівень взаємної кореляції за рахунок перестановки частотних елементів шляхом повного перебору з рідних вихідних послідовностей, в різних смугах частот і змінній ширині смуг фільтрації, при цьому об'єм ансамбля складних сигналів можна збільшити на величину, яка дорівнює кількості частотних елементів.

Отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями в частотній області, який відрізняється від уже відомих застосуванням смугової фільтрації до псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області з наступним перенесенням в спільну область частот з подальшими перестановками, який забезпечує можливість формування ансамблів складних сигналів з необхідними рівнями максимальних викидів бічних пелюсток ФВК та об'ємами, що значно перевищують об'єми ансамблів на основі відомих сигналів.

Розроблений алгоритм реалізації методу формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками було реалізовано як програмний продукт у середовищі Matlab.

У результаті проведених досліджень розраховані значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сигналів не перевищують $R_{\max} \leq 3/\sqrt{B}$ і таким чином повною мірою задовольняють вимогу мінімальної подоби сигналів. Оптимальне значення смуги фільтрації дорівнює 0,2 % від загальної смуги частот

вихідних послідовностей. Сформовані ансамблі, отримані шляхом смугової фільтрації з перестановками мають гірші взаємкореляційні властивості, відносно сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду через те, що тривалість імпульсів збільшується пропорційно зменшенню смуги частот сигналу, але їхнє значення задовольняє умову мінімальної подоби і такі сигнали можуть застосовуватися в когнітивних телекомунікаційних системах. Результати оцінки ансамблевих властивостей доводять збільшення об'єму ансамбля складних сигналів, відносно об'єму ансамбля на основі вихідних послідовностей.

У четвертому розділі визначений спосіб вибору параметрів сигналів, який дозволяє підібрати оптимальні значення для вихідних послідовностей, на основі яких формують ансамблі сигналів збільшеного об'єму з заданими рівнями максимальних викидів бічних пелюсток ФВК. Проведено порівняльну характеристику взаємкореляційних властивостей сигналів, яка показує, що сформовані ансамблі сигналів за методом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду мають кращі взаємкореляційні властивості ніж ансамблі на основі відомих сигналів. При цьому рівень максимальних викидів бічних пелюсток ФВК розроблених сигналів на 7-12 % менше показників відомих сигналів. При оцінці рівнів максимальних викидів бічних пелюсток ФВК сформованих сигналів, отриманих шляхом смугової фільтрації з перестановками виявлено, що їхнє значення задовольняє умову мінімальної подоби і такі сигнали можуть застосовуватися в когнітивних телекомунікаційних системах. Результати, отримані при порівняльній характеристиці ансамблевих властивостей сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками з відомими сигналами показують збільшення об'єму ансамблів сигналів на 16-26 %.

Ключові слова: когнітивна телекомунікаційна система, складний сигнал, завада множинного доступу, максимальні викиди бічних пелюсток функції взаємної кореляції, об'єм ансамбля.

ABSTRACT

Indyk S. V. The formation methods of complex signal ensembles for cognitive telecommunication systems. – Qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

The dissertation submitted in fulfilment of the candidate of technical sciences degree on specialty 05.12.02 «Telecommunication systems and networks». - Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation research is devoted to the development of the formation methods of complex signal ensembles for cognitive telecommunication systems, which allow increasing the volume of ensembles while providing a low level of multiple access interference.

The scientific novelty of the dissertation is due to a new approach to solving an important scientific and applied problem, which is to develop the formation methods of complex signals ensembles for cognitive telecommunication systems that increase the volume of ensembles while providing low levels of multiple access interference.

For the first time, a permutation method of frequency elements of signals by complete search was developed, which allows increasing the volume of complex signals ensembles by analyzing all possible combinations of frequency elements with subsequent selection of the optimal permutation.

The formation method of complex signals ensembles obtained by permutation of time intervals of sequences, which differs from the known ones in formation of a centered series based on the average value of the maximum emissions of side lobes of the CCF, has been improved.

The formation method of complex signals ensembles, based on sequences with improved intercorrelation properties, which are obtained by bandpass filtering with permutations, is implemented on the basis of selection from the spectrum of sequences of

equal bands with complex signals ensembles at a given level of multiple access interference.

The practical significance of the obtained research results is:

Development of software implementation of the formation method of complex signal ensembles, which are obtained by permutation of time intervals of sequences based on a centered series, which improves the correlation properties of formed complex signal ensembles in comparison with known ensembles based on sequences with low energy interaction and reduce levels of the maximum emissions of side lobes of the CCF by 7 - 12 %.

Development of a software implementation of the permutation method of frequency elements of signals by full search, which allows increasing the volume of ensembles of complex signals in m times, where m is the number of permutations of frequency elements.

Development of a software implementation of the formation method of complex signals ensembles, based on the use of sequences with improved intercorrelation properties, which are obtained by bandpass filtering with permutations, which allows to increase the volume of complex signals ensembles compared to known ensembles by 16-26 %.

According to the thesis, 11 scientific papers were published: 6 articles were published in professional scientific journals approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine (including 1 article in the journal indexed by the WEB OF SCIENCE scientometric database) and 5 approbation papers.

The introduction presents the relevance of the thesis, the connection with scientific programs, substantiates the aim and research tasks of the study, and defines the object and subject of research. The list of results of the dissertation research, which determine the scientific novelty, is given; the practical significance of the obtained scientific results is formulated. Information on the implementation, testing, publication of scientific and practical results of the dissertation and the personal contribution of the author of the dissertation in scientific articles, which are co-authored are given.

In the first chapter, it was analyzed the intercorrelation properties of complex signals, which shows that the known methods of combating MAI (MAI - multiple access interference) do not reduce their level to an acceptable value at random time shift. The main factors influencing the value of the MAI and the number of subscribers served in the CTS (CTS – cognitive telecommunication system) are identified. The necessity of development of formation methods of complex signals ensembles for CTS with code division of channels on the basis of pseudorandom sequences with low interaction in time and frequency domains, research of their ensemble and intercorrelation properties is substantiated.

In the second chapter, the formation method of complex signals ensembles in the time domain, taking into account the intercorrelation properties, which differs from the already known ones in division of sequences into time intervals with subsequent permutations based on a centered series, was further developed. The signals generated by this method have a low level of MAI, which is determined by the values of the maximum emissions of the side lobes of the CCF.

An algorithm for implementing the formation method of complex signals ensembles obtained by permutation of time intervals of sequences based on a centered series, which allows to form complex signals ensembles based on sequences with minimal energy interaction was implemented as a software product in Matlab.

The study results of the intercorrelation properties of signals obtained by permutation of time intervals of sequences based on a centered series show that they satisfy the condition of minimum similarity and have better, in relation to known signals, intercorrelation properties. The results obtained from studies of the ensemble properties of signals obtained by permutation of time intervals of sequences based on a centered series, prove that they have a much larger volume of ensembles than ensembles of known signals used in cognitive telecommunication radio systems with code channel separation. The use of the formed ensembles of complex signals with the increased volume will allow increasing the number of simultaneously served subscribers at low levels of MAI.

In the third chapter the method of permutations of frequency elements of signals by full search is developed. The signals generated by this method have a low level of cross-correlation due to the permutation of frequency elements by complete search from different output sequences, in different frequency bands and changes in the width of the filter bands. In this case, the volume of complex signals ensemble can be increased by an amount equal to the number of frequency elements.

The formation method of complex signals ensembles, based on sequences with improved intercorrelation properties, in the frequency domain, which differs from the already known ones in application of bandpass filtering to pseudo-random sequences with low interaction in the time domain, with followed transfer to a common frequency domain, followed by permutations, provides the ability to form complex signals ensembles with the required levels of maximum emissions of the side lobes of the cross-correlation function and volumes that significantly exceed the volumes of ensembles based on known signals.

The developed algorithm for implementing the formation method of complex signals ensembles, based on sequences with improved intercorrelation properties, obtained by bandpass filtering with permutations was implemented as a software product in the Matlab environment.

As a result of the recent researches the calculated values of the maximum emissions of the side lobes of CCF of signals do not exceed $R_{\max} \leq 3/\sqrt{B}$, therefore fully satisfy requirements of the minimum similarity of signals. The optimal value of the filter band is equal to 0,2 % of the total frequency band of the output sequences. Formed ensembles obtained by permutation bandpass filtering have worse intercorrelation properties as compared to signals obtained by permutation of time series sequences based on a centered series due to the fact that the pulse duration increases in proportion to the decrease of the signal bandwidth, but their value satisfies the minimum similarity condition and such signals can be used in cognitive telecommunications systems. The results of the ensemble properties estimation show

an increase in the volume of the complex signals ensemble relative to the volumes of ensembles based on the original sequences.

The fourth chapter defines the method of selecting signal parameters, which allows you to select the optimal values for the output sequences, based on which form signals ensembles of increased volume with specified levels of maximum emissions of the side lobes of CCF. The comparative characteristic of intercorrelation properties of signals is studied, which shows that the formed signal ensembles, by the method of time sequences intervals permutation on the basis of the centered series, have better intercorrelation properties than ensembles on the basis of known signals. The level of maximum emissions of the side lobes of the CCF of the developed signals is 7-12 % less than the known signals. When estimating the levels of maximum emissions of the side lobes of the CCF generated signals, which are obtained by bandpass filtering with permutations, it was found that their value satisfies the condition of minimum similarity and such signals can be used in cognitive telecommunications systems. The results obtained by comparative characterization of ensemble properties of signals, based on sequences with improved intercorrelation properties, which were obtained by bandpass filtering with permutations with known signals show an increase in the volume of signal ensembles by 16-26 %.

Keywords: cognitive telecommunication system, complex signal, multiple access interference, the maximum emission of the side lobes of CCF, ensemble volume.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України:

1. Індик С. В. Аналіз адаптивних алгоритмів стану дискретного каналу за результатами аналізу якості приймання блока даних. Збірник наукових праць

Української державної академії залізничного транспорту. Харків: УкрДАЗТ, Вип. 98. 2008. С. 32-37.

2. Indyk S., Lysechko V. The study of ensemble properties of complex signals obtained by time interval permutation. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, № 3. P. 85-88. DOI: 10.20998/2522- 9052.2020.3.11.

3. Indyk S., Lysechko V. Method of permutation of intervals, taking into account correlation properties of segments. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 3 (61). P. 128-130. DOI:10.26906/SUNZ.2020.3.

4. Indyk S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Kitov V. S. The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. Issue 4 (55). P. 7-15. DOI 10.15588/1607-3274-2020-4-1 [WEB OF SCIENCE].

5. Індик С. В., Лисечко В. П. Дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області. *Збірник наукових праць*. Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба. 2020. Вип. 4 (66). С. 46-50. DOI: 10.30748/zhups.2020.66.06

6. Indyk S. V., Lysechko V. P. The formation method of complex signals ensembles with increased volume based on the use of frequency bands. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 4 (62). P. 119-121.

Статті у збірниках за матеріалами конференцій:

1. Індик С. В., Лисечко В. П. Вплив частотної фільтрації на взаємкореляційні характеристики ансамблів складних сигналів. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доповідей VII Міжнар. наук.-техніч. конф. (Полтава, 20 - 21 квітня 2017 р.)* Полтава: ПНТУ. 2017. С. 6.

2. Індик С. В., Лисечко В. П. Дослідження кореляційних характеристик ансамблів складних сигналів отриманих за рахунок перестановок частотних

ділянок псевдовипадкових послідовностей. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 33-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті (Харків, 30 жовтня 2020 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 3. С. 24-25.

3. Індик С. В., Лисечко В. П. Статистичний аналіз властивостей ансамблів складних сигналів отриманих за рахунок перестановок ранжованих часових інтервалів. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей X Міжнар. наук.-практ. конф., (Запоріжжя, 07–09 жовтня 2020 р.)*. Запоріжжя: НУЗП. 2020. С. 29-30.

4. Індик С. В., Лисечко В. П. Метод формування ансамблів складних сигналів за рахунок аналізу частотної вибірки смуг спектра псевдовипадкових послідовностей з малою енергетичною взаємодією. *Застосування Сухопутних військ Збройних Сил України у конфліктах сучасності: тези доповідей Всеукр. наук.-практ. конф., (Львів, 20 листопада 2020 р.)*. Львів: НАСВ. 2020. С. 154-155.

5. Індик С. В., Лисечко В. П. Аналіз статистичних характеристик ансамблів складних сигналів з покращеними взаємокореляційними властивостями. *Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: тези доповідей VI Всеукр. наук.-практ. конф., (Полтава, 06 листопада 2020 р.)*. Полтава: НУПП. 2020. С. 193-166.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ОБ'ЄМУ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ	26
1.1. Загальна характеристика когнітивних телекомунікаційних систем	26
1.2. Аналіз взаємкореляційних властивостей складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем	28
1.3. Оцінювання впливу завад множинного доступу на роботу когнітивних телекомунікаційних систем	33
1.3.1 Оцінювання впливу завад множинного доступу на роботу когнітивних телекомунікаційних систем з урахуванням енергетичних властивостей сигналів	33
1.3.2 Оцінювання впливу завад множинного доступу на роботу когнітивних телекомунікаційних систем з урахуванням кореляційних властивостей сигналів	38
1.4 Аналіз методів зменшення завад множинного доступу	44
1.5 Висновки до розділу 1.	46
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ В ЧАСОВІЙ ОБЛАСТІ З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОКОРЕЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	47
2.1 Реалізація процедури розбиття вихідних послідовностей на часові інтервали	47
2.2 Метод формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду	59

2.3 Дослідження властивостей ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі рейтингового ряду	66
2.4. Висновки до розділу 2	71
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ФОРМУВАННЯ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ З ПОКРАЩЕНИМИ ВЗАЄМОКОРЕЛЯЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ, В ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ	72
3.1 Метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору	73
3.2 Метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками	79
3.3 Аналіз взаємокореляційних властивостей ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками	87
3.4 Оцінювання об'єму ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками	94
3.5 Висновки до розділу 3	99
РОЗДІЛ 4. ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СФОРМОВАНИХ АНСАМБЛІВ СКЛАДНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОГНІТИВНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ	101
4.1 Розроблення практичних рекомендацій з вибору параметрів сформованих сигналів	101
4.2 Порівняльна характеристика взаємокореляційних властивостей відомих сигналів з розробленими сигналами	105
4.3 Порівняння об'ємів відомих сигналів з розробленими сигналами	107

	17
4.4 Висновки до розділу 4	111
ВИСНОВКИ	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	117
Додаток А Фрагмент програми мовою Matlab для реалізації методу формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду	126
Додаток Б Фрагмент програми мовою Matlab для реалізації методу формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками	134
Додаток В Фрагмент програми мовою Matlab для реалізації розрахунків взаємкореляційних властивостей сигналів	144
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	151
Додаток Д Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CRS – (Cognitive Radio System) – когнітивна радіосистема
IEEE 802.22 – Стандарт безпроводових регіональних мереж
WRAN – Wireless Regional Area Network
LTE – (Long Term Evolution)
CCF – cross-correlation function
MAI – multiple access interference
SSF – функція сканування спектра;
ШСС – широкополосний сигнал
КТС – когнітивна телекомунікаційна система
ЗМД – завада множинного доступу
РЕС – радіоелектронна система
АФХ амплітудно-частотна характеристика
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ФВН – функція відносної невизначеності
ФН – функція невизначеності
ФАК – функція автокореляції
ФВК – функція взаємної кореляції
АС – абонентська станція
БС – базова станція
ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

Актуальність роботи. Для збільшення ефективності використання транспортного потенціалу України, зокрема як транзитної держави, необхідним є розвиток інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами з урахуванням сучасних вимог у сфері зв'язку, навігації та спостереження. Удосконалення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечить одержання органами управління, державної влади та іншими користувачами просторово-часової достовірної інформації про місцезнаходження рухомих об'єктів і їхні характеристики, раціональне використання систем і засобів зв'язку, навігації і спостереження шляхом їхньої інформаційної інтеграції, сприятиме впровадженню сучасних інформаційних, телекомунікаційних і радіотехнологій. Це підвищить рівень комунікації та зворотного зв'язку між органами управління транспортом, транспортними підприємствами та користувачами транспортних послуг, підвищить ефективність управління транспортом та якість транспортно-логістичних послуг, сприятиме мінімізації економічних втрат при перевезенні вантажів, скороченню простоїв транспортних засобів і рентабельності вантажних перевезень.

Збільшення попиту на додаткову пропускну здатність з боку різних служб радіозв'язку в умовах обмеженості радіочастотного ресурсу призводить до ускладнення середовища управління використанням спектра. Для вирішення цих завдань необхідно застосовувати інноваційні методи, що дозволять забезпечити ефективне використання служб, розподілених у смузі частот, у тому числі спільне використання обмежених радіочастотних ресурсів. Застосування підходів на основі динамічного доступу може сприяти ефективному використанню спектра. Однак для його реалізації необхідно вирішити ряд складних завдань, основним з яких є впровадженням нових сигнально-кодових конструкцій. При вирішенні цих завдань доцільно використовувати інноваційні функціональні можливості радіосистем на основі когнітивних технологій. У системах радіозв'язку на основі множинного доступу абонентські сигнали

перекриваються за частотою і зсунуті один відносно одного в часі випадково, внаслідок чого виникають ЗМД. Такі завади мають значний вплив на якість зв'язку та кількість абонентів, що обслуговуються одночасно, і закладені в самих принципах побудови КТС. Розвитку даного напрямку присвячені роботи J. Mitola III, H. Arslan, G. Q. Maguire Jr., S. Haykin, P. Setoodeh.

Питанням удосконалення сигнально-кодкових конструкцій займаються як вітчизняні, так і закордонні вчені. Зокрема використання імпульсних складних сигналів у радіолокації запропонував Е. Хатман. На розвиток теорії складних сигналів суттєво вплинули роботи Р. Бенджаміна, Ч. Кука та М. Бернфельда. Р. Хартлі ввів поняття логарифмічної міри інформації. Д. В. Агєєв поклав початок досліджень кодового ущільнення та розділення. Внесок до розвитку теорії і техніки генерування і обробки складних сигналів внесли: Л. Є. Варакін, В. П. Іпатов, І. М. Пишкін, Т. О. Оганов, О. О. Харкевич, В. М. Харченко, В. П. Лисечко. У роботах приділяється увага завданням боротьби з завадами множинного доступу, які виникають при одночасній роботі радіосистем у загальній смузі частот і впливають на кількість одночасно обслуговуваних абонентів та якість зв'язку між ними, але завдання збільшення об'єму ансамблів сигналів розглянуті недостатньо.

Таким чином, існує необхідність розроблення нових методів формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, для когнітивних телекомунікаційних систем на основі множинного доступу.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу як існуючих, так і перспективних когнітивних телекомунікаційних мереж на основі систем з кодовим розділенням каналів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дослідження у дисертаційній роботі безпосередньо пов'язані з такими положеннями: НДР Українського державного університету залізничного транспорту «Дослідження загальнодержавних вимог до розподілу частот України, новітніх цифрових систем технологічного радіозв'язку та розроблення плану використання

радіочастотного ресурсу мереж технологічного радіозв'язку АТ «Українська залізниця»» (ДР№ 0121U100191), а саме – вдосконалено метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, сформованих шляхом смугової фільтрації з наступним перенесенням в спільну область частот отриманих частотних елементів та перестановкою, що дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів при заданому рівні завад множинного доступу у порівнянні з відомими ансамблями на 16-26 %;

НДР Національної академії Національної Гвардії України, шифр «Поляна 3» (ДР№ 0116U004048), а саме – вдосконалено метод формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей за рахунок використання центрованого ряду на основі середніх значень максимальних викидів бічних пелюсток функцій взаємної кореляції отриманих послідовностей, застосування якого дозволяє знизити рівень завад множинного доступу на 7-12 %;

Концепція розвитку телекомунікацій в Україні, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 червня 2006 р., № 316-р (із змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 1612-р (1612-2008-р) від 27.12.2008 р.);

Стратегія сталого розвитку «Україна–2020», схвалена Указом Президента України від 12 січня 2015 р. № 5/2015.226. Тема дисертаційної роботи пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, наведеними в «Переліку пріоритетних тематичних напрямів, наукових досліджень і науково-технічних розробок на 2011-2015 р.», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.;

Постанова про затвердження Правил надання та отримання телекомунікаційних сервісів від 11 квітня 2012 р. № 295 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 14 від 15.01.2020 р.).

Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напряму кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня завад множинного доступу.

Для досягнення вищезазначеної мети необхідно вирішити такі **часткові завдання досліджень:**

1. Провести аналіз шляхів збільшення об'єму ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем.
2. Розробити метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору.
3. Удосконалити метод формування ансамблів складних сигналів в часовій області з урахуванням взаємкореляційних властивостей.
4. Розвинути метод формування ансамблів складних сигналів на основі використання послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями в частотній області.
5. Розробити програмну реалізацію методів формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями у часовій та частотній областях.
6. Дослідити кореляційні та ансамблеві властивості отриманих сигналів.

Об'єктом досліджень є процес формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем.

Предметом досліджень являються методи формування ансамблів складних сигналів, отриманими шляхом перетворення послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями.

Методи дослідження. При вирішенні часткових наукових завдань дисертаційної роботи використовувались методи теорії ймовірностей і випадкових процесів, статистичної теорії зв'язку, при розробленні методу формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору та методу

формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками – числові методи обробки емпіричних даних.

Для підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів застосовувались методи імітаційного моделювання. Аналіз результатів експериментальних досліджень проводився з використанням методів математичної статистики, програмні продукти побудовані на основі середовища Matlab.

Вибір методів досліджень забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків, що підтверджується збіжністю результатів експериментальних досліджень з теоретичними і практичними результатами, відображеними в публікаціях, і обумовлений відповідністю положенням теорії обробки сигналів.

Наукова новизна положень, розроблених особисто здобувачем обумовлена новим підходом до вирішення важливого науково-прикладного завдання, що полягає у розробленні методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем, які дозволяють збільшити об'єм ансамблів при забезпеченні низького рівня ЗМД.

1. Вперше розроблено метод перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів за рахунок аналізу всіх можливих комбінацій частотних елементів з подальшим вибором оптимального варіанта перестановок.

2. Удосконалено метод формування ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей, який відрізняється від відомих формувань центрованого ряду на основі середнього значення максимальних викидів бічних пелюсток ФВК, застосування якого дозволяє знизити рівень завад множинного доступу і збільшити об'єм ансамбля.

3. Отримав подальшого розвитку метод формування ансамблів складних сигналів на основі послідовностей з покращеними взаємокореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками,

реалізований на основі виділенні зі спектра послідовностей рівних смуг з наступним перенесенням в спільну область частот і подальшим застосуванням перестановок, що дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів при заданому рівні ЗМД.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає:

1) у розробленні програмної реалізації методу формування ансамблів складних сигналів, отриманими шляхом перестановки часових інтервалів послідовностей на основі центрованого ряду, який дозволяє покращити взаємкореляційні властивості сформованих ансамблів складних сигналів у порівнянні з відомими ансамблями на основі послідовностей з низьким рівнем енергетичної взаємодії і зменшити рівні максимальних викидів бічних пелюсток функції взаємної кореляції на 7-12 %.

2) розробленні програмної реалізації методу перестановок частотних елементів сигналів шляхом повного перебору, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів в m раз, де m – число перестановок частотних елементів.

3) розробленні програмної реалізації методу формування ансамблів складних сигналів на основі використання послідовностей з покращеними взаємкореляційними властивостями, отриманими шляхом смугової фільтрації з перестановками, який дозволяє збільшити об'єм ансамблів складних сигналів у порівнянні з відомими ансамблями на 16-26 %.

Отриманні в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання: в НДР Українського державного університету залізничного транспорту «Дослідження загальнодержавних вимог до розподілу частот України, новітніх цифрових систем технологічного радіозв'язку та розроблення плану використання радіочастотного ресурсу мереж технологічного радіозв'язку АТ «Українська залізниця»» (ДР№ 0121U100191);

НДР Національної академії Національної Гвардії України, шифр «Поляна 3» (ДР№ 0116U004048).

Особистий внесок здобувача. Всі результати викладені у дисертаційній роботі, отримані автором самотійно. У роботах, виконаних у співавторстві і опублікованих у наукових фахових виданнях України та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, особистий внесок автора полягає у розробленні методів формування ансамблів складних сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем. У статтях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачу належать такі результати: у роботі [17] – метод перестановки інтервалів з урахуванням взаємкореляційних властивостей сегментів, у роботі [18] проведено дослідження властивостей ансамблів складних сигналів, отриманих шляхом перестановок часових інтервалів на основі центрованого ряду, у роботі [30] – метод формування ансамблів складних сигналів шляхом частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, у роботі [31] проведено дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області, у роботі [38] – метод формування ансамблів складних сигналів збільшеного об'єму на основі використання частотних смуг.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати, одержані в процесі досліджень, доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях: VII Міжнародній науково-технічній конференції (Полтава, 20-21 квітня 2017 р.); 33-й Міжнародній науково-практичній конференції (Харків, 30 жовтня 2020 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції (Запоріжжя, 07–09 жовтня 2020 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції (Львів, 20 листопада 2020 р.); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції (Полтава, 06 листопада 2020 р.).

У повному обсязі результати дисертаційної роботи заслухано та схвалено на розширеному засіданні кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту.

Публікації. Результати наукових досліджень відображено в 11 друкованих працях, зокрема в шести статтях у наукових фахових виданнях України (з них п'ять – у наукових фахових виданнях України, одна у журналі, внесеному до міжнародної

наукометричної бази даних WEB OF SCIENCE), п'ять публікацій у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 156 сторінок, у тому числі 116 сторінок основного тексту, 31 рисунок, 9 таблиць, список використаних джерел із 114 найменувань на 9 сторінках і 5 додатків на 31 сторінці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gupta S., Malagar V. IEEE 802.22 Standard for Regional Area Networks. International Conference on Next Generation Computing and Information Systems. Conference. 2017. DOI: 10.1109/ICNGCIS.2017.20
2. Маковеевко Д. В. Стандарт IEEE 802.22. Технологии. Применение. Перспективы [Электронный ресурс]. URL: <http://asp24.com.ua/blog/standart-ieee-802-22-tehnologii-primenenie-perspektivy> (останняя дата звернення: 04.12.2020).
3. Stevenson C. R., Chouinard G., Zhongding Lei, Wendong Hu, Shellhammer S. J., Caldwell W. IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard. IEEE Communications Magazine. 2009. Vol. 47. P. 130 – 138.
4. Arslan. H., Arslan Y. Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems. 2007. Springer. 2007. P. 327. ISBN 978-1-4020-5541-6.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Москва: Издательский дом «Вильямс». 2003. 1104 с.
6. Ipatov V. P. Spread spectrum and CDMA: Principles and applications. Chichester: John Wiley & Sons. 2005. 385 p. DOI10.10020470091800.
7. Varakin L. E. Communication systems with noise-like signals. Moscow: Radio and communication. 1985. 384 p.
8. Варакин Л. Е. Теория систем сигналов. М.: Сов. Радио. 1978. 304 с.
9. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков С. И. и др. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: «Радио и связь». 1985. 264 с.
10. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи. М.: Радио и связь. 2003. 640 с.
11. Семенихин В. С., Пышкин И. М. Сухопутная подвижная радиосвязь. Кн. 1. Основы теории. М.: Радио и связь. 1990. 432с.
12. Пышкин И. М. Теория кодового разделения сигналов. М.: Связь. 1980. 208 с.
13. Пестряков В. Б. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. М.: Сов радио. 1969. 424 с.

14. Алексеев А. И., Шереметьев А. Г., Тузов Г. И., Глазов Б. И. Теория и применение псевдослучайных сигналов. М.: Наука. 1969. 365 с.
15. Оганов Т. А. Помехоустойчивость инвариантного приема импульсных сигналов. М: Радио и связь. 1984. 176 с.
16. Пестряков В. Б. Шумоподобные сигналы. М.: Сов. Радио. 1973. 424 с.
17. Indyk S., Lysechko V. The study of ensemble properties of complex signals obtained by time interval permutation. *Advanced Information Systems*. 2020. Volume. 4, № 3. P. 85-88. DOI: 10.20998/2522- 9052.2020.3.11.
18. Indyk S., Lysechko V. Method of permutation of intervals, taking into account correlation properties of segments. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 3 (61). P. 128-130. DOI:10.26906/SUNZ.2020.3.
19. Qiu R. C., Hu Zh., Li H., Wicks M. C. *Cognitive radio communications and networking*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. 514 p. DOI:10.1002/9781118376270.
20. Setoodeh P. Haykin S. *Fundamentals of cognitive radio*. Hoboken: John Wiley & Sons. 2017. 207 p. DOI:10.1002/9781119405818.
21. Arslan H. *Cognitive radio, software defined radio and adaptive wireless systems*. Dordrecht: Springer. 2007. 453p. DOI:10.1007/9781402055423.
22. Лысечко В. П. Метод формирования ансамблей сложных сигналов на основе последовательностей с минимальным энергетическим взаимодействием. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХУПС. 2005. Вип. № 1 (1). С. 65-68.
23. Степаненко Ю. Г. Метод формування ансамблів складних сигналів шляхом перестановки часових інтервалів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. 2010. Вип. 4 (16). С.183-186.
24. Степаненко Ю. Г., Жученко С. С., Чигрин Д. С. Метод перестановки часових інтервалів шляхом поетапного перебору. *Системи озброєння і військова техніка: науковий журнал*. Х.: ХУПС. 2012. Вип. 3(31). С. 235-238.
25. Дьяконов В. *MATLAB 6: учебный курс*. СПб.: Питер. 2001. 592 с.

26. Максимов М. В. Защита от радиопомех. М.: Советское радио. 1999. 496 с.
27. Степаненко Ю. Г., Лисечко В. П., Трубочанінова К. А. Кореляційні та енергетичні властивості ансамблів складних сигналів. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. 2009. Вип. 2 (10). С.166-169.
28. Харченко В. Н., Яковлев М. Ю., Лисечко В. П. Анализ свойств сложных сигналов. Системи обробки інформації. Харків: ХВУ. 2004. Вип. 9(37). С.190-195.
29. Северинов А. В., Лисечко В. П., Жученко А. С. Анализ ансамблевых свойств сложных сигналов. Системи обробки інформації. Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба. 2006. Вип. 5 (54). С.105-108.
30. Indyk S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Kitov V. S. The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2020. Issue 4 (55). P. 7 – 15. DOI 10.15588/1607-3274-2020-4-1.
31. Індик С. В., Лисечко В. П. Дослідження ансамблевих властивостей складних сигналів, отриманих за рахунок частотної фільтрації псевдовипадкових послідовностей з низькою взаємодією в часовій області. Збірник наукових праць. Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба. 2020. Вип. 4 (66). С.46-50. DOI: 10.30748/zhups.2020.66.06
32. Palicot J. Favennec P.-N. Radio engineering: from software to cognitive radio. Hoboken: John Wiley & Sons. 2011. 378 p. DOI:10.1002/9781118602218.
33. Iacobucci M. S. Reconfigurable radio systems: network architectures and standards. Chichester: John Wiley & Sons. 2013. 275 p. DOI:10.1002/9781118398401.
34. Cameron R. J., Kudsia C. M., Mansour R. R. Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications. New York : Wiley & Sons. 2007. 771 p. DOI:10.1002/9781119292371.

35. Ghasemi A., Sousa S. E. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges, and design trade-off. *IEEE Communications Magazine*. 2008. Volume 46. p. 32–39.
36. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования.: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь. 1984. 248 с.
37. Степаненко Ю.Г., Лисечко В. П., Приходько С. І. Метод визначення періоду проходження коротких відеоімпульсів в кодових послідовностях на основі апроксимації функції Хевісайда. Системи озброєння і військова техніка. Х.: ХУПС. 2009. Вип. 4(20). С. 170-173.
38. Indyk S. V., Lysechko V. P. The formation method of complex signals ensembles with increased volume based on the use of frequency bands. *Control, navigation and communication system*. 2020. Issue 4 (62). P. 119-121.
39. Гришенцев А.Ю. Цифровые системы широкополосной связи. Часть 1. Введение в пространства и методы преобразования сигналов. СПб: Университет ИТМО. 2019. 72 с.
40. Sloane N. J. A., Plouffe S. *The Encyclopedia of Integer Sequences*, Academic Press. San Diego. 1995. 587 p. ISBN 0-12-558630-2.
41. Pandit Sh., Singh G. *Spectrum sharing in cognitive radio networks*. Solan: Springer. 2017. 426 p. DOI:10.1007/9783319531472.
42. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2000. 480с.
43. Цимринг Ш. Е. Специальные функции и определенные интегралы. Алгоритмы. Программы для микрокалькуляторов. Справочник. М.: Радио и связь. 1988. 272 с.
44. Касами Т., Токура Н., Ивадари Е., Инагаки Я. Теория кодирования. М.: Мир. 1978. 576 с.
45. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир. 1976. 578 с.
46. Кларк Дж., Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М.: Радио и связь. 1987. 392 с.

47. Алексич Г. Проблемы сходимости ортогональных рядов. М.: Иностранная литература. 1963. 359 с.
48. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер. 2002. 608 с:
49. Давыдов А.В. Сигналы и линейные системы: Тематические лекции. Екатеринбург: УГГУ. ИГиГ. Фонд электронных документов. 2006.
50. Харкевич А. А. Борьба с помехами. М.: Наука. 1965. 275 с.
51. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г., Арустамов С.А. Цифровые системы широкополосной связи. Часть 2. Оконные и вейвлет-функции и преобразования: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Университет ИТМО. 2019. 42 с.
52. Корічнев Л. П., Корольов В. Д. Статистичний контроль каналів зв'язку. М.: Радіо і зв'язок, 1989. 249 с.
53. Индик С. В. Аналіз адаптивних алгоритмів стану дискретного каналу за результатами аналізу якості приймання блока даних. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Харків: УкрДАЗТ. Вип. 98. 2008. С. 32–37.
54. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов. М.: Советское радио. 1970. 373 с.
55. Ипатов В. П., Орлов В. И., Самойлов И. М., Смирнов В. Н. Системы мобильной связи. М.: Горячая линия-Телеком. 2003. 272с.
56. Д. В. Агеев. Основы теории линейной селекции. Научно-технический сборник. ЛЭИС. 1935. №10.
57. Ranganathan R., Qiu R., Hu Z. Radio for Smart Grid: Theory, Algorithms, and Security. 2011. С. 14.
58. Romero Perez, Sallent O., Ferrus R., Agusti R. On the configuration of radio resource management in a sliced RAN. 2018. Proceedings of the NOMS. P. 28–30.
59. Звіт MCE-R SM.2405-0. 2017. <http://www.itu.int/pub/R-REP/en>.

60. Saleem Y., Rehmani M. H. Primary radio user activity models for cognitive radio networks: a survey. 2014. *Journal of Network and Computer Applications*. Vol. 43. P. 1-16.
61. Кук Ч. Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Советское радио. 1971. 568 с.
62. Hartley. R. V. L. *Transmission of Information*. Bell System Technical Journal. 1928. p. 535-563.
63. Харкевич А. А. Основы радиотехники. Москва: Физматлит. 2007. 512 с.
64. Yang C., Shao H.-R. Wifi-based indoor positioning. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53(3). P. 90–105.
65. Mitola J. III, Maguire G. Q. Jr. Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communication*. 1999. Vol. 6(4). P. 13-18.
66. Тихвинский В. О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. М: Эко-Трендз. 2010. 284 с.
67. Скрынников В.Г., Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. М.: Спорт и Культура-2000. 2012. 864 с.
68. Shafie A. E., Sultan A. Optimal random access for a cognitive radio terminal. 2013. *IEEE Communications Letters*. Vol. 17(6). P. 90–95.
69. Wyglinski A. M., Nekovee M., Hou Y. T. *Cognitive Radio Communications and Networks: Principles and Practice*. 2009. P. 43–45.
70. Parker M. *Digital Signal Processing 101. Everything You Need to Know to Get Started*. Newnes. 2017. 432 p.
71. Wilson S.-K., Wilson S., Biglieri E. *Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications. Transmission Techniques for Digital Communications*. Academic Press. 2016. 750 p.
72. Esmailzadeh R. *Broadband Telecommunications Technologies and Management*. Carnegie Mellon University. Adelaide. Willey. 2016. 359 p. DOI:10.1002/9781119114956.

73. Cajetan M. Akujuobi, Matthew N. O. Sadiku. Introduction to Broadband Communication Systems. New York. Chapman and Hall/CRC. 2013. 456 p. DOI: 10.1201/b15844.
74. Кузнецов В. С. Теория многоканальных широкополосных систем связи. М.: Горячая линия-Телеком. 2013. 200 с. ISBN 978-5-9912-0281-7.
75. Вишневский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера. 2005. 592 с.
76. Мазурков М. И. Системы широкополосной радиосвязи. Одесса: Наука и техника. 2009. 344 с.
77. Лёзин Ю. С. Введение в теорию радиотехнических систем. – М.: Радио и связь, 1985, -384с.
78. Сакалема, Д. Ж. Подвижная радиосвязь. М.: Горячая линия-Телеком. 2012. 512 с.
79. Бабков В. Ю., Никитин А. Н., Осенний К. Н., Сивере М. А. Системы связи с кодовым разделением каналов. СПб: ТРМАДА, 2003-239 с.
80. Маковеева М. М., Шинаков Ю. С. Системы связи с подвижными объектами. М.: Радио и связь. 2002. 440 с.
81. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи. М.: Горячая линия-Телеком. 2006. 536 с.
82. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство. 2013. 166 с.
83. Аболиц А. И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность. М.: ИТИС. 2004. 426 с.
84. Ефанов В. И., Тихомиров А. А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Учебное пособие. Томск: ТУСУР. 2012. 228 с. ISBN 5-86889-188-0.
85. Ключев Л. Л. Теория электрической связи. Минск: Техноперспектива. 2008. 424 с. ISBN 978-985-6591-58-0.

86. Кузнецов М. А., Рыжков А. Е. Современные технологии и стандарты подвижной связи. СПб.: Линк, 2008. - 128 с. - ISBN 5-98595-006-9.
87. Зюко А. Г., Фалько А. И., Панфилов И. П., Банкет Л. В., Иващенко П. В. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. М.: Радио и связь. 1985. 272 с.
88. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи широкопasmового радіодоступу. К.: Наукова думка. 2009. 312 с.
89. Петрович Н. Т., Размахнин М. К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Советское радио, 1969. 233 с.
90. Голованов В.В., Яковлев А.О. Проектирование аналоговых и цифровых фильтров. М.: МАИ. 1993. 56 с.
91. Тронин Ю. В., Гурский О. В. Синтез фильтров. Учебное пособие. Москва. МАИ. 1990. 76 с.
92. Дьяконов В. MATLAB 6: учебный курс. СПб.: Питер, 2001. 592 с.
93. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. СПб.: Питер; Киев: BHV. 2005. 512 с.
94. Sesia S. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. 2nd edition. Wiley. 2011. 792 p.
95. Cox C. An Introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G Mobile Communications. John Wiley & Sons Ltd. 2012. 337 p.
96. Rahnema M., Dryjanski M. From LTE to LTE-Advanced Pro and 5G. Boston; London: Artech House. 2017. 372 p. ISBN-10 1630814539.
97. Рыжков А. Е., Сиверс М. А., Воробьев В. О., Гусаров А. С., Слышков А. С., Шуньков А. В. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMAX. Учебник. Санкт-Петербург: Линк. 2012. 226 с.
98. Ziemer R. E., Peterson R. W., Borth D. E. Introduction to Spread-Spectrum Communications. Pearson. 1995. 695 p.
99. Berg O., Berg T., Haavik S., Hjelmstad J., Skaug R. Spread Spectrum in Mobile Communication. The Institution of Electrical Engineers. 1998. 478 p.

100. Torrieri Don. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems. 4th Edition. Springer International Publishing AG. 2018. 733 p.
101. Харченко В. М., Лаврут О. О. Энергетичний розрахунок супутникових радіоліній: Навчальний посібник. Х.: ХВУ. 2000. 47 с.
102. Fette B. Cognitive Radio Technology. Academic Press. 2009. 828 p.
103. Tawk Y., Constantine J., Christodoulou C. G. Antenna Design for Cognitive Radio. Boston: Artech House. 2016. 289 p.
104. Jayaweera S. K. Signal Processing for Cognitive Radios. John Wiley. 2015. 802 p.
105. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. 5-е изд., испр. М.: Эко-Трендз. 1998. 240 с.
106. Бузов А. Л., Казанский Л. С., Романов В. А., Сподобаев Ю. М. Антенно-фидерные устройства систем сухопутной подвижной радиосвязи. Москва: Радио и связь. 1997. 150 с.
107. Солодовник В. Ф., Воробьев А. В. Системы подвижной радиосвязи. Учеб. пособие. Харьков: НАУ. 2014. 142 с.
108. Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарев Д. В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и Техникаю 2005. 400 с.
109. Берлин А. Н. Цифровые сотовые системы связи. М.: Эко-Трендз. 2007. 296 с.
110. Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и

шумов. М.: Издательство иностранной литературы. 1960. 467 с.

111. Шахтарин Б. И. Случайные процессы в радиотехнике. Цикл лекций. М.: Радио и связь. 2000. 584 с.

112. Горелов Г. В., Фомин А. Ф., Волков А. А., Котов В. К. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте. М.: Транспортю 2001. 415 с.

113. Гадзиковский В. И. Теоретические основы цифровой обработки сигналов. М.: Радио и связь. 2004. 344 с.

114. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. М.: Вильямс. 2004. 992 с.