

Національний університет «Чернігівська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Семендяй Сергій Матвійович

УДК [004.94:004.75]:004.421(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ В
БЕЗПРОВІДНИХ ЗАСОБАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ**

122 – Комп’ютерні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Семендяй С.М.

Науковий керівник
Зайцев Сергій Васильович,
доктор технічних наук, професор

Чернігів – 2026

АНОТАЦІЯ

Семендяй С. М. Методи та моделі забезпечення цілісності даних в безпроводних засобах передачі інформації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» – Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розробленні методів і моделей забезпечення цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації на основі адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів.

Актуальність теми дослідження зумовлена широким застосуванням безпроводних каналів передачі даних у сучасних розподілених інформаційних системах, де цілісність даних виступає однією з базових характеристик, що визначає коректність функціонування алгоритмів системи, достовірність результатів оброблення інформації та обґрунтованість прийняття рішень. Особливої критичності це питання набуває у системах керування безпілотними літальними апаратами, де порушення цілісності переданої інформації безпосередньо впливає на керованість і функціональну стійкість системи. Аналіз сучасних досліджень показує, що традиційні методи забезпечення цілісності даних, зокрема завадостійке кодування, розширення спектра, псевдовипадкове переналаштування частоти та методи ортогонального частотного мультиплексування, є ефективними переважно за умов випадкових завад, але виявляються недостатніми при застосуванні сучасних засобів радіоелектронної боротьби, які реалізують адаптивні алгоритми пригнічення сигналів. Існуючі моделі процесу передачі даних здебільшого базуються на припущенні стаціонарності середовища та не враховують його часову змінність, структуру навмисних впливів і накопичений досвід функціонування системи, що формує

протиріччя між вимогами до забезпечення цілісності даних і можливостями відомих підходів.

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси передачі та обробки даних у безпроводних системах передачі інформації в умовах навмисних завад.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, спрямовані на забезпечення цілісності інформації у безпроводних системах передачі даних.

Метою дисертаційної роботи є розроблення методів і моделей забезпечення цілісності даних у безпроводних засобах передачі інформації на основі адаптивного керування параметрами каналу зв'язку в умовах навмисних завад, а також експериментальна перевірка їх ефективності засобами комп'ютерного імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язано такі задачі: виконано системний аналіз сучасних підходів до побудови безпроводних систем передачі даних як складних динамічних систем оброблення інформації; формалізовано процес передачі даних у вигляді узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних із урахуванням параметрів середовища та дестабілізуючих впливів, описаних сценаріями функціонування; розроблено метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних; удосконалено модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування; обґрунтовано систему показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі; проведено обчислювальні експерименти для оцінювання ефективності запропонованих рішень.

У роботі використано методи математичного та імітаційного комп'ютерного моделювання, методи алгоритмічного аналізу, методи теорії керування та теорії прийняття рішень, а також методи об'єктно-орієнтованого програмування. Методи математичного моделювання використано для формалізації інформаційних процесів передачі та обробки даних, опису динаміки стану каналу, зв'язку між енергетичними, часовими та ймовірнісними характеристиками системи. Методи імітаційного комп'ютерного моделювання застосовано для створення комп'ютерної моделі системи передачі даних,

дослідження її функціонування в умовах змінної завадової обстановки та проведення серії обчислювальних експериментів. Методи теорії керування та прийняття рішень використано під час розроблення алгоритмів адаптивного реагування на деградацію каналу, а методи алгоритмічного аналізу – під час дослідження правил блокування, вибору та зміни параметрів каналу передачі даних.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено об'єкт, предмет, мету та завдання роботи, наведено методи дослідження, сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про апробацію, публікації та впровадження результатів.

У першому розділі виконано аналіз сучасних підходів до побудови безпроводних систем передачі даних у контексті задач адаптивного керування інформаційними процесами в умовах дестабілізуючих впливів. Розглянуто принципи когнітивного та програмно-визначеного радіо як технологічну основу для реалізації програмно-керованих механізмів адаптації параметрів передачі, проаналізовано фактори, що знижують стійкість і цілісність даних у безпроводних системах, узагальнено вимоги до апаратно-програмного середовища реалізації адаптивних алгоритмів керування параметрами каналу передачі даних, а також визначено етапи формалізації, програмної реалізації та подальшого дослідження моделі передачі даних. За результатами розділу сформовано теоретичні та методичні передумови для побудови математичної й імітаційної моделей процесу передачі даних та розроблення алгоритмів адаптивного керування параметрами передачі даних.

У другому розділі здійснено формалізацію каналу передачі даних як об'єкта комп'ютерного моделювання в умовах навмисних дестабілізуючих впливів. Розглянуто канал передачі даних безпроводних систем передачі інформації як нестационарний об'єкт із змінними у часі параметрами, побудовано модель навмисних завад і формалізовано їх часові, спектральні та енергетичні параметри, враховано апаратні обмеження програмно-визначеного радіо, розроблено модель помилок передачі даних у нестационарних умовах та введено

показники оцінювання цілісності даних. На цій основі побудовано узагальнену імітаційну модель каналу передачі даних, виконано перевірку узгодженості її параметрів і сформовано математичну модель каналу передачі даних як нелінійної динамічної системи з керуванням і збуреннями, що створює модельну основу для подальшого синтезу алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних.

У третьому розділі розроблено метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, який формалізує процес прийняття рішень у нестационарному середовищі на основі багатокритеріального оцінювання стану каналу передачі даних, та відповідний модельно-алгоритмічний підхід. Запропоновано алгоритми моніторингу та виявлення деградації якості передачі, тимчасового блокування проблемних ресурсів і вибору альтернативних конфігурацій, а також сформовано багаторівневу систему метрик цілісності даних на рівнях біта, повідомлення, кадру та сценарію. Розроблено структури даних і обчислювальний каркас комп'ютерного моделювання, що забезпечують відтворюваність експериментів і аналіз динаміки інформаційних процесів. Побудовано формалізовану модель взаємодії системи передачі даних із зовнішнім дестабілізуючим середовищем з урахуванням часових затримок і обмежень, а також структурну і функціональну архітектуру імітаційної моделі, що інтегрує підсистеми передачі, прийому, моніторингу та адаптивного керування у замкнений цикл обробки даних.

У четвертому розділі наведено результати верифікації імітаційної комп'ютерної моделі та обчислювальних експериментів щодо оцінювання ефективності методу адаптивного керування параметрами каналу передачі даних. Підтверджено адекватність моделі шляхом узгодження залежностей BER від E_b/N_0 з теоретичними характеристиками, а також коректного відтворення процесів синхронізації, впливу частотних зсувів і нестационарності середовища. Проведено серії експериментів у різних сценаріях дестабілізуючих впливів і виконано порівняльний аналіз адаптивного та неадаптивного режимів функціонування системи за показниками BER, SNR та інтегральних

характеристик якості передачі. Обґрунтовано використання інтегрального та ковзного BER як критеріїв оцінювання ефективності інформаційних процесів. Експериментально встановлено, що застосування адаптивного керування забезпечує зменшення рівня бітових помилок на декілька порядків та збереження цілісності даних під час передачі у змінних умовах функціонування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробленні узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних, яка, на відміну від відомих, забезпечує моделювання процесів передавання даних в умовах навмисних впливів шляхом інтеграції параметризованих моделей каналу, середовища та дестабілізуючих впливів, описаних сценаріями функціонування, у межах єдиної формалізованої структури, що дозволило реалізувати сценарно-орієнтоване моделювання функціонування каналу та обґрунтувати вибір адаптивних стратегій керування параметрами каналу передачі даних.

На основі розробленої моделі вперше запропоновано метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, який, на відміну від відомих, що базуються на статичних правилах або миттєвих енергетичних показниках каналу, забезпечує прийняття рішень шляхом комплексного врахування апіорної інформації про множину допустимих каналів, поточного стану каналу за метриками цілісності даних, часової динаміки функціонування системи та історії попередніх станів каналів із використанням механізму їх тимчасового блокування, що дозволило підвищити обґрунтованість вибору робочого каналу, зменшити ймовірність повторного використання непридатних частот і забезпечити цілісність даних у процесі передачі в умовах динамічного завадового середовища.

Удосконалено модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, який, на відміну від відомих, що базуються на аналізі лише поточних значень параметрів каналу, ґрунтується на інтегрованому використанні обчислювальної моделі каналу, метрик цілісності даних та часової динаміки й історії змін характеристик каналу шляхом реалізації багатокритеріального оцінювання його стану, що дозволило виявляти тенденції

деградації каналу, зменшувати втрати інформації у перехідних режимах і підвищити ефективність передачі даних з точки зору їх цілісності.

Набув подальшого розвитку метод моделювання та оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадового впливу, який, на відміну від існуючих, розширено за рахунок використання сценарного моделювання завад та системи інтегральних і коєвних метрик стану системи (BER, PER, SNR, PoI), що забезпечує можливість кількісного порівняння ефективності алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних та вибору найбільш ефективної стратегії функціонування системи для заданого сценарію завадового впливу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена імітаційна модель каналу передачі даних, яка є узагальненою та параметризованою, може використовуватися як інструмент для синтезу та дослідження адаптивних алгоритмів керування параметрами каналу передачі даних. Вона забезпечує відтворення динамічної взаємодії каналу з навмисним завадовим середовищем, що дозволяє оцінювати ефективність запропонованого методу адаптивного керування в різних сценаріях функціонування та обґрунтовувати вибір параметрів системи з урахуванням вимог до цілісності даних.

Запропонований метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних реалізований у складі програмно-апаратних засобів сучасних безпроводних систем зв'язку, зокрема на базі SDR-платформ. Його впровадження забезпечує організацію процесу прийняття рішень щодо вибору робочих каналів та параметрів передачі на основі багатокритеріальної оцінки стану каналу, що безпосередньо сприяє підвищенню стійкості функціонування системи та забезпеченню цілісності інформації під час передачі в умовах завадового впливу.

Удосконалений модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування використовується при розробленні програмного забезпечення систем передачі даних у вигляді модулів моніторингу, аналізу стану каналу та формування

керуючих рішень. Його застосування дозволяє враховувати часову динаміку процесів, інерційність системи та історію станів каналу, що забезпечує більш обґрунтоване керування параметрами каналу передачі даних та зменшення втрат інформації у перехідних режимах.

Розроблений підхід до оцінювання стану каналу передачі даних, який базується на узагальненому поданні показників якості передачі та їх часової еволюції, використовується для побудови систем діагностики та контролю якості зв'язку. Це дозволяє не лише фіксувати факт деградації, а й аналізувати її розвиток у часі та враховувати накопичений вплив завад, що підвищує ефективність прийняття рішень у динамічному середовищі.

Розроблені моделі, методи та алгоритми застосовуються під час виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт для формування сценаріїв функціонування систем передачі даних, оцінювання їх стійкості до навмисних дестабілізуючих впливів та розроблення рекомендацій щодо підвищення ефективності їх функціонування.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в діяльність ТОВ «Інформаційні системи захисту», ТОВ «НІКС» та в освітній процес Національного університету «Чернігівська політехніка», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Основні результати дисертації опубліковано у наукових працях, що відображають теоретичні, модельні та алгоритмічні результати дослідження, а також апробовано на науково-практичних конференціях, присвячених питанням комп'ютерних наук, інформаційної безпеки, комп'ютерного моделювання та безпроводних систем передачі інформації.

Ключові слова: безпроводні системи передачі даних, цілісність даних, достовірність, імітаційне моделювання, алгоритми, інформаційні процеси, захист інформації, кібербезпека, інформаційна безпека, спектральний аналіз, завади, завадостійке кодування, турбокоди, інформаційні системи, БпЛА, безпілотний літальний апарат, програмно-визначене радіо, нейронні мережі.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Semendiai S., Tkach Y., Shelest M., Korchenko O., Ziubina R., Veselska O. Improving the Efficiency of UAV Communication Channels in the Context of Electronic Warfare // International Journal of Electronics and Telecommunications. 2023. Vol. 69, No. 4. P. 727–732.
<https://doi.org/10.24425/ijet.2023.147694> (дата звернення 07.04.2026 через VPN-сервери Польщі).
2. Семендяй С. М. Використання технології когнітивного радіо для підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2023. № 4(20). С. 220–229.
<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20.220229>
3. Семендяй С. М. Підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби // Технічні науки та технології. 2023. № 2(32). С. 224–234.
[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-224-234](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-224-234)
4. Семендяй С. М. Адаптивне спектральне маневрування в системах керування роботизованими комплексами в умовах радіоелектронної боротьби // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 2(30). С. 616–629.
<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.937>
5. Зайцев С. В., Василенко В. М., Семендяй С. М. Огляд адаптивних методів забезпечення достовірності передачі інформації при використанні завадостійкого кодування у системах бездротового зв'язку // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 278–286.
<https://doi.org/10.15276/imms.v11.no4.278>

Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Семендяй С. М., Зайцев С. В. Метод забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних за рахунок структурної адаптації та використання нейронних мереж // Безпека ресурсів інформаційних систем:

- матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 16–17 квітня 2020 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2020. С. 182–185.
7. Семендй С. М. Протидія засобам радіоелектронної боротьби у логістичних безпілотних апаратах шляхом застосування когнітивного радіо // ITSec: Безпека інформаційних технологій: матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Тернопіль, 22–24 травня 2025 р.). Київ: ДУІКТ, 2025. С. 171–173.
 8. Семендй С. М. Кіберзахист автономних логістичних систем на базі БПЛА: поточні виклики та прогнози // Юність науки – 2025: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів 23–25 квіт. 2025 р.). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. С. 1136–1137.

ABSTRACT

Semendiai S. M. Methods and Models for Ensuring Data Integrity in Wireless Information Transmission Devices. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 122 «Computer Science» – Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, 2026.

In the dissertation, a relevant scientific and applied problem has been solved, which consists in the development of methods and models for ensuring data integrity in wireless data transmission systems based on adaptive control of data transmission channel parameters under conditions of intentional destabilizing influences.

The relevance of the research topic is determined by the widespread use of wireless data transmission channels in modern distributed information systems, where data integrity is regarded as one of the fundamental properties that ensures the correctness of algorithm functioning, the reliability of data processing results, and the validity of decision-making. This issue becomes particularly critical in unmanned aerial vehicle control systems, where violations of the integrity of transmitted information directly affect controllability and the functional stability of the system. The analysis of current research shows that traditional methods of ensuring data integrity, including error-correcting coding, spectrum spreading, pseudo-random frequency hopping, and orthogonal frequency division multiplexing techniques, are effective mainly under random interference conditions but prove insufficient under the action of modern electronic warfare systems that implement adaptive signal suppression scenarios. Existing models of the data transmission process are mostly based on the assumption of channel stationarity and do not adequately account for temporal variability, the structure of intentional influences, and accumulated system operation experience, which creates a contradiction between the requirements for ensuring data integrity and the capabilities of existing approaches.

The object of the research is information processes of data transmission and processing in wireless data transmission systems under intentional interference.

The subject of the research is methods, models, and algorithms for adaptive control of data transmission channel parameters aimed at ensuring data integrity in wireless data transmission systems.

The purpose of the dissertation is to develop methods and models for ensuring data integrity in wireless data transmission systems based on adaptive control of communication channel parameters under intentional interference, as well as experimental validation of their effectiveness using computer simulation modeling.

To achieve this goal, the following tasks were solved: a systematic analysis of modern approaches to the design of wireless data transmission systems as complex dynamic information processing systems was performed; the data transmission process was formalized in the form of a generalized simulation model of the data transmission channel, taking into account environmental parameters and scenario-based destabilizing influences; a method for adaptive control of data transmission channel parameters was developed; the model-algorithmic approach to adaptive control was improved; a system of indicators for evaluating data integrity and transmission efficiency was substantiated; computational experiments were conducted to evaluate the effectiveness of the proposed solutions.

The research employs methods of mathematical and computer simulation modeling, algorithmic analysis, control theory, decision-making theory, and object-oriented programming. Mathematical modeling methods were used to formalize data transmission and processing processes, describe channel state dynamics, and establish relationships between energy, temporal, and probabilistic characteristics of the system. Computer simulation modeling methods were applied to develop a simulation model of the data transmission system, study its operation under varying interference conditions, and conduct a series of computational experiments. Control and decision-making theory methods were used in developing adaptive response algorithms to channel degradation, while algorithmic analysis methods were applied to study channel blocking, selection, and parameter switching rules.

The Introduction substantiates the relevance of the research topic, defines the object, subject, purpose, and objectives of the study, describes the research methods,

formulates the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and provides information on the approbation, publications, and implementation of the results.

Chapter 1 presents an analysis of modern approaches to the design of wireless data transmission systems in the context of adaptive control of information processes under destabilizing influences. The principles of cognitive radio and software-defined radio are considered as a technological basis for implementing software-controlled mechanisms for adapting transmission parameters. Factors that reduce robustness and data integrity in wireless systems are analyzed, requirements for the hardware and software environment for implementing adaptive algorithms are generalized, and the stages of formalization, software implementation, and further investigation of the data transmission model are defined. Based on the results of the chapter, theoretical and methodological prerequisites for constructing mathematical and simulation models of the information process and for developing adaptive control algorithms for transmission parameters are formed.

Chapter 2 formalizes the data transmission channel as an object of computer modeling under intentional destabilizing influences. The data transmission channel of wireless information systems is considered as a non-stationary object with time-varying parameters; a model of intentional interference is constructed and its temporal, spectral, and energy parameters are formalized; hardware constraints of software-defined radio are taken into account; a model of data transmission errors under non-stationary conditions is developed; and metrics for evaluating data integrity are introduced. On this basis, a generalized simulation model of the data transmission channel is constructed, the consistency of its parameters is verified, and a mathematical model of the channel is formed as a nonlinear dynamic system with control and disturbances, which creates a model basis for the further synthesis of adaptive control algorithms for data transmission parameters.

In Chapter 3, a method for adaptive control of data transmission parameters is developed, which formalizes the decision-making process in a non-stationary environment based on multi-criteria evaluation of the state of the data transmission

channel, as well as the corresponding model-algorithmic approach. Algorithms for monitoring and detecting transmission quality degradation, temporary blocking of problematic resources, and selection of alternative configurations are proposed, and a multi-level system of data integrity metrics at the levels of bit, message, frame, and scenario is formed. Data structures and a computational framework for computer simulation are developed, ensuring reproducibility of experiments and analysis of the dynamics of information processes. A formalized model of the interaction between the data transmission system and the external destabilizing environment is constructed, taking into account temporal delays and constraints, along with a structural and functional architecture of the simulation model that integrates transmission, reception, monitoring, and adaptive control subsystems into a closed-loop data processing cycle.

Chapter 4 presents the results of verification of the simulation model and computational experiments aimed at evaluating the effectiveness of the adaptive control method for data transmission parameters. The adequacy of the model is confirmed through the agreement of BER versus E_b/N_0 dependencies with theoretical characteristics, as well as through correct reproduction of synchronization processes, the impact of frequency offsets, and the non-stationarity of the environment. A series of experiments under different scenarios of destabilizing influences is conducted, and a comparative analysis of adaptive and non-adaptive modes of system operation is performed based on BER, SNR, and integral quality characteristics. The use of integral and sliding BER as criteria for evaluating the efficiency of information processes is substantiated. It is experimentally established that the application of adaptive control ensures a reduction in the bit error rate by several orders of magnitude and preserves data integrity during transmission under varying operating conditions.

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of a generalized simulation model of a data transmission channel which, unlike existing approaches, enables the modeling of data transmission processes under intentional impacts by integrating parameterized models of the channel, the environment, and destabilizing influences defined by operational scenarios within a unified formalized framework, which made it possible to implement scenario-oriented modeling of

channel operation and to substantiate the selection of adaptive strategies for controlling the parameters of the data transmission channel.

Based on the developed model, a method for adaptive control of data transmission channel parameters under intentional destabilizing influences has been proposed for the first time. Unlike known approaches based on static rules or instantaneous energy-based channel indicators, the proposed method ensures decision-making through comprehensive consideration of a priori information about the set of permissible channels, the current channel state evaluated using data integrity metrics, the temporal dynamics of system operation, and the history of previous channel states with the application of a mechanism for their temporary blocking. This made it possible to increase the validity of selecting the operating channel, reduce the probability of reusing unsuitable frequencies, and ensure data integrity during transmission in a dynamic interference environment.

The model-algorithmic approach to adaptive control of data transmission parameters has been further developed. In contrast to known approaches based solely on the analysis of current channel parameter values, it relies on the integrated use of the computational channel model, data integrity metrics, and the temporal dynamics and history of channel states through the implementation of multi-criteria state evaluation. This made it possible to identify trends in channel degradation, reduce information losses in transient modes, and improve the efficiency of data transmission in terms of data integrity.

The method for modeling and evaluating the efficiency of operation of wireless data transmission systems under interference has been further developed; unlike existing approaches, it has been extended through the use of scenario-based interference modeling and a system of integral and sliding system state metrics (BER, PER, SNR, PoI), which enables quantitative comparison of the effectiveness of adaptive control algorithms for data transmission channel parameters and the selection of the most efficient system operation strategy for a given interference scenario.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that the developed simulation model of the data transmission channel, being generalized and

parameterized, can be used as a tool for the synthesis and investigation of adaptive algorithms for controlling data transmission parameters. It provides reproduction of the dynamic interaction between the channel and an intentional interference environment, which makes it possible to evaluate the effectiveness of the proposed adaptive control method under various operating scenarios and to substantiate the selection of system parameters with regard to data integrity requirements.

The proposed method for adaptive control of data transmission channel parameters has been implemented as part of the hardware-software components of modern wireless communication systems, in particular on the basis of SDR platforms. Its implementation ensures the organization of the decision-making process regarding the selection of operating channels and transmission parameters based on multi-criteria evaluation of the channel state, which directly contributes to improving system robustness and ensuring data integrity during transmission under interference conditions.

The improved model-algorithmic approach to adaptive control is used in the development of software for data transmission systems in the form of modules for monitoring, channel state analysis, and generation of control decisions. Its application makes it possible to take into account the temporal dynamics of processes, system inertia, and the history of channel states, thereby ensuring more substantiated control of transmission parameters and reducing information losses in transient modes.

The developed approach to evaluating the state of the data transmission channel, based on a generalized representation of transmission quality indicators and their temporal evolution, is used for the construction of diagnostic and communication quality monitoring systems. This makes it possible not only to detect the fact of degradation, but also to analyze its evolution over time and account for the accumulated impact of interference, thereby increasing the effectiveness of decision-making in a dynamic environment.

The developed models, methods, and algorithms are applied in the course of research and development activities for forming operational scenarios of data

transmission systems, evaluating their resistance to intentional destabilizing influences, and developing recommendations for improving their efficiency.

The results of the dissertation research have been implemented in the activities of “Information Security Systems” LLC, “NIKS” LLC, and in the educational process of the Chernihiv Polytechnic National University, as confirmed by the relevant implementation acts.

The main results of the dissertation have been published in scientific works reflecting the theoretical, model-based, and algorithmic outcomes of the research, and have also been presented at scientific and practical conferences dedicated to computer science, information security, computer modeling, and wireless data transmission systems.

Keywords: wireless data transmission systems, data integrity, reliability, simulation modeling, algorithms, information processes, information protection, cybersecurity, information security, spectral analysis, interference, error-correcting coding, turbo codes, information systems, UAV, unmanned aerial vehicle, software-defined radio, neural networks.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ	37
1.1 Аналіз сучасних підходів до побудови безпроводових систем зв'язку із використанням технологій когнітивного та програмно-визначеного радіо....	37
1.1.1 Когнітивне радіо як підхід до подолання недовикористання спектра	38
1.1.2 Програмно-визначене радіо	44
1.1.3 Вплив дестабілізуючих факторів радіоелектронної природи на інформаційні процеси у безпроводних системах передачі даних	45
1.1.4 Вимоги до радіоелектронних засобів безпроводних інформаційних систем	47
1.2 Огляд апаратної платформи експериментального дослідження безпроводних інформаційних систем	48
1.2.1 SDR-платформа USRP B200mini	49
1.2.2 SDR-платформа USRP B210.....	51
1.2.3 Наземний сегмент експериментального комплексу	52
1.3 Алгоритмічні принципи реалізації когнітивного радіо на базі заданої SDR- платформи.....	54
1.4 Етапи формалізації та програмної реалізації імітаційної моделі адаптивного каналу передачі даних для цільової системи.....	58
1.5 Застосування нейронних мереж і адаптивного кодування в когнітивному радіо.....	61
1.6 Етапи розробки методу протидії дестабілізуючим впливам у безпроводних інформаційних системах	63
Висновки за розділом 1	65

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ТА НАВМИСНИХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ	68
2.1 Особливості каналу передачі даних у безпроводних системах	68
2.2 Модель навмисних завад у каналі передачі інформації	69
2.2.1 Особливості протидії БпЛА засобами РЕБ.....	71
2.2.2 Тактико-технічні характеристики типових комплексів РЕБ	75
2.2.3 Пригнічення навігаційної системи БпЛА	86
2.2.4 Пригнічення радіоканалів керування та передачі даних БпЛА.....	86
2.3 Параметри навмисних завад та особливості їх впливу на канал	95
Формування алгоритму дій засобу пригнічення	96
2.4 Врахування апаратних обмежень програмно-визначеного радіо при моделюванні каналу	99
Особливості апаратної реалізації на USRP B200 mini та USRP B210	100
2.5 Модель помилок передачі даних у нестационарних умовах	102
Поняття цілісності даних у контексті безпроводного каналу керування....	104
2.6 Узагальнена імітаційна модель каналу передачі даних.....	106
2.6.1 Формування параметрів імітаційної моделі каналу зв'язку	108
2.6.2 Перевірка узгодженості параметрів імітаційної моделі.....	120
2.7 Математична модель каналу передачі даних як об'єкта адаптивного керування	122
Висновки до розділу 2	126
РОЗДІЛ 3. МЕТОД АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ НАВМИСНИХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ.....	128
3.1 Принципи адаптивного керування параметрами каналу передачі даних	128
3.1.1 Розробка адаптивного методу вибору каналу зв'язку цільової системи, призначеного для протидії навмисному завадовому впливу.....	129

3.1.2 Метод задання пріоритетних каналів зв'язку під час передексплуатаційного програмування	129
3.1.3 Метод моделювання та оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадового впливу.....	133
3.1.4 Обґрунтування системи показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі інформації	141
3.2 Удосконалений модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних.....	147
3.2.1 Алгоритм реагування на завади у діючому каналі керування.....	148
3.2.2 Процедура виключення діючого каналу із зондування.....	150
3.3 Фонові умови функціонування каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів	151
3.3.1 Модель взаємодії каналу передачі даних та дестабілізуючого середовища.....	153
3.3.2 Функціональна модель взаємодії каналу передачі даних та дестабілізуючого середовища	155
3.3.3 Часова модель взаємодії безпроводного каналу керування та завадового середовища	158
3.3.4 Створення імітаційної моделі засобу РЕБ противника	160
3.3.5 Метод пригнічення каналу РКК БпЛА, реалізований в імітаційній моделі засобу РЕБ (МПК).....	163
3.4 Алгоритм тимчасового блокування зайнятих каналів	166
3.5 Алгоритм вибору нового робочого каналу передачі даних	169
3.6 Структурна схема реалізації адаптивного методу.....	171
3.6.1 Повна структура імітаційної моделі адаптивного каналу керування цільової системи	171
3.6.2 Послідовність процесів функціонування моделі АКК	176

	21
3.7 Формалізований опис методу адаптивного вибору робочого каналу керування	179
Висновки до розділу 3	181
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ.....	184
4.1 Верифікація адекватності імітаційної моделі каналу передачі даних	184
4.1.1 Постановка задачі верифікації	185
4.1.2 Верифікація енергетичних характеристик.....	185
4.1.3 Верифікація частотної моделі	189
4.1.5 Перевірка масштабованості швидкості передачі	193
4.1.6 Узагальнений висновок щодо адекватності	193
4.2 Початкові умови та сценарії експериментів	193
4.3 Часова динаміка перемикачів	195
4.3 Обґрунтування вибору інтегрального BER для аналізу стійкості адаптивного каналу передачі даних.....	199
4.4 Порівняння адаптивного та неадаптивного режимів	202
4.5 Кількісне обґрунтування впливу BER на цілісність кадру	208
Висновки за розділом 4	209
ВИСНОВКИ.....	211
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	214
ДОДАТКИ.....	227
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	228
ДОДАТОК Б Відомості про апробацію результатів дисертації	230
ДОДАТОК В Довідки про впровадження	231
ДОДАТОК Г Програмний код реалізації алгоритмів адаптивного вибору каналу	235

ДОДАТОК Д Програмний код алгоритмів виявлення завад, спектрального аналізу та блокування каналів	239
ДОДАТОК Е Програмний код вибору нового робочого каналу, ранжування та перемикання	242

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

2G – Second Generation Mobile Telecommunications

3G – Third Generation Mobile Telecommunications

4G – Fourth Generation Mobile Telecommunications

8-PSK – 8-Phase Shift Keying

ACK – Acknowledgment

AGC – Automatic Gain Control

API – Application Programming Interface

ASCII – American Standard Code for Information Interchange

AWGN – Additive White Gaussian Noise

BER – Bit Error Rate

BPSK – Binary Phase Shift Keying

CDMA – Code Division Multiple Access

CR – Cognitive Radio

CRC – Cyclic Redundancy Check

CSI – Channel State Information

DoS – Denial of Service

FDD – Frequency Division Duplex

FEC – Forward Error Correction

FER – Frame Error Rate

FPGA – Field-Programmable Gate Array

FPV – First Person View

GFSK – Gaussian Frequency Shift Keying

GPS – Global Positioning System

GPSDO – GPS Disciplined Oscillator

GSM – Global System for Mobile

ECM – Electronic Countermeasure

EW – Electronic Warfare

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IQ – In-phase and Quadrature
LSTM – Long Short-Term Memory
LTE – Long Term Evolution
MAC – Medium Access Control
MAVLink – Micro Air Vehicle Link
MIMO – Multiple-Input Multiple-Output
OCXO – Oven Controlled Crystal Oscillator
PER – Packet Error Rate
PLL – Phase-Locked Loop
PoI – Probability of Integrity
PSK – Phase Shift Keying
PU – Primary User
QAM – Quadrature Amplitude Modulation
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying
QXO – quartz crystal oscillator
RF – Radio Frequency
RFIC – Radio Frequency Integrated Circuit
RRC – Root Raised Cosine Filter
RSSI – Received Signal Strength Indicator
RTT – Round Trip Time
SDR – Software Defined Radio
SU – Secondary User
TCXO – Temperature-Controlled Crystal Oscillator
UAV – Unmanned Aerial Vehicle
UDP – User Datagram Protocol
USB – Universal Serial Bus
USRP – Universal Software Radio Peripheral
WEP – Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi – Wireless Fidelity
WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

WPA – Wi-Fi Protected Access

WRAN – Wireless Regional Area Network

АКК – Адаптивний канал керування

БпЛА – Безпілотні літальні апарати

ДРВ – Джерело радіовипромінювання

ІНС – Інерціальна навігаційна система

ІТВ – Інформаційно-технічний вплив

КС – Канал спостереження

КУ – Канал управління

МПК – Метод пригнічення каналу РКК БпЛА

ОС – Обчислювальна система

ПЗ – Програмне забезпечення

ПК – Персональний комп'ютер

ПО – Пульти оператора

ППРЧ – Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти

РЕБ – Радіоелектронна боротьба

РКК – Радіоканал керування

РРТР – Радіо- та радіотехнічна розвідка

СПР – Система прийняття рішень

СРНС – Супутникова радіонавігаційна система

ТТХ – Тактико-технічні характеристики

УКХ – Ультракороткі хвилі

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні розподілені інформаційні системи характеризуються активним використанням безпроводних каналів передачі даних як невід’ємної складової процесів обміну та оброблення інформації. У таких системах цілісність даних розглядається як фундаментальна властивість, що забезпечує коректність функціонування алгоритмів системи, достовірність результатів оброблення інформації та обґрунтованість прийняття рішень. Особливої критичності це набуває у системах керування безпілотними літальними апаратами, де навіть короточасне порушення цілісності переданої інформації може призводити до втрати керованості або повної деградації функціонування системи [24].

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що традиційні методи забезпечення цілісності даних, зокрема завадостійке кодування, розширення спектра сигналу, використання псевдовипадкового переналаштування робочої частоти (ППРЧ), а також методи передачі з використанням ортогонального частотного мультиплексування (OFDM), є ефективними переважно за умов випадкових або слабо структурованих завад [18; 33; 72]. Водночас сучасні комплекси радіоелектронної боротьби здатні виявляти, аналізувати та цілеспрямовано пригнічувати такі сигнали шляхом реалізації адаптивних сценаріїв впливу, включаючи широкосмугове та вузькосмугове пригнічення, швидке переналаштування та повторне ураження раніше використаних частот [15; 17; 79]. У таких умовах зазначені методи не забезпечують необхідного рівня захисту інформації, оскільки їх параметри стають прогнозованими або доступними для аналізу, що призводить до різкого зростання ймовірності помилок та порушення цілісності даних.

Існуючі моделі процесу передачі даних у більшості випадків базуються на спрощених припущеннях щодо стаціонарності каналу та не враховують його часову еволюцію, структуру навмисних впливів і накопичений досвід функціонування системи [37]. Відомі алгоритми адаптації параметрів передачі орієнтовані переважно на миттєві показники якості каналу, що обмежує їх

здатність адекватно реагувати на складні сценарії деградації в реальному часі. Це формує протиріччя між вимогами до забезпечення цілісності даних у динамічних умовах та можливостями існуючих моделей і алгоритмів.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення модельно-алгоритмічних підходів, що забезпечують формалізацію процесу передачі даних як складної динамічної системи оброблення інформації та реалізують адаптивне керування параметрами каналу передачі даних на основі комплексного аналізу його стану. Це дозволить забезпечити збереження цілісності даних у системах, що функціонують в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, зокрема в задачах керування безпілотними літальними апаратами.

У роботі прикладні безпроводні системи передачі даних розглядаються як ілюстративний кейс, що забезпечує параметричну наближеність комп'ютерної моделі до реальних умов функціонування інформаційно-комунікаційних систем. Аналіз характеристик дестабілізуючих впливів, сценаріїв їх прояву та обмежень обчислювальних і апаратних ресурсів використовується для коректної параметризації моделі та формування реалістичних сценаріїв обчислювальних експериментів. При цьому апаратні платформи розглядаються як референтне середовище для визначення допустимих часових, частотних і обчислювальних параметрів алгоритмів, а не як самостійний об'єкт дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до наукових напрямів, пов'язаних із дослідженням методів і моделей обробки та передачі даних у безпроводних інформаційних системах, а також із забезпеченням цілісності інформації в умовах дії дестабілізуючих факторів.

Результати дисертаційного дослідження отримано в межах науково-дослідної роботи «Методи й моделі забезпечення цілісності даних у каналах керування БПЛА в умовах застосування засобів РЕБ» (державний реєстраційний номер: 0125U001728), спрямованої на розвиток методів комп'ютерного моделювання інформаційних процесів у безпроводних засобах передачі

інформації, алгоритмів адаптивної обробки даних і оцінювання якості передачі інформації в умовах навмисних завад. Автор дисертаційної роботи брав участь у цій науково-дослідній роботі як відповідальний виконавець.

Тематика дисертації відповідає основним положенням наукових програм і планів, пов'язаних із дослідженням:

- розроблення методів забезпечення цілісності та достовірності даних у безпроводних та розподілених інформаційних системах;
- створення алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах динамічної зміни характеристик середовища;
- застосування імітаційного комп'ютерного моделювання для дослідження процесів передачі даних у безпроводних каналах;
- побудову та аналіз моделей навмисного завадового впливу на канали безпроводного зв'язку.

Дисертаційна робота є складовою наукових досліджень, спрямованих на підвищення ефективності обробки даних і забезпечення інформаційної стійкості безпроводних засобів передачі інформації, що відповідає пріоритетним напрямкам розвитку комп'ютерних наук у частині математичного та алгоритмічного моделювання інформаційних процесів.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методів і моделей забезпечення цілісності даних у безпроводних засобах передачі інформації на основі адаптивного керування параметрами каналу зв'язку в умовах навмисних завад, а також експериментальна перевірка їх ефективності засобами комп'ютерного імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести системний аналіз сучасних підходів до побудови безпроводних систем передачі даних як складних динамічних систем оброблення інформації, що функціонують в умовах нестаціонарного завадового середовища, з урахуванням концепцій когнітивного та програмно-визначеного радіо, з метою формалізації вимог до математичних моделей, алгоритмів адаптивного

керування та процедур прийняття рішень щодо параметрів каналів передачі даних.

2. Формалізувати процес передавання даних у безпроводних системах в умовах навмисних завадових впливів шляхом розроблення узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних, що забезпечує моделювання процесів передавання даних з урахуванням параметрів каналу, часової динаміки середовища та дестабілізуючих впливів, описаних сценаріями функціонування.

3. Розробити метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, що базується на комплексному врахуванні апріорної інформації про множину допустимих каналів, поточного стану каналу за метриками цілісності даних, часової динаміки системи та історії станів каналів із застосуванням механізму їх тимчасового блокування.

4. Удосконалити модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних шляхом інтегрованого використання обчислювальної моделі каналу, метрик цілісності даних та часової динаміки і історії змін характеристик каналу для реалізації багатокритеріального оцінювання його стану.

5. Обґрунтувати систему показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі інформації, зокрема на основі використання BER, PER та інтегральних і ковзних метрик, придатних для аналізу функціонування системи в умовах динамічної завадової обстановки та забезпечення адаптивного керування параметрами каналу передачі даних.

6. Провести серії обчислювальних експериментів із використанням розробленої комп'ютерної моделі та оцінити ефективність запропонованого методу адаптивного керування параметрами каналу передачі даних у різних сценаріях навмисного завадового впливу.

Об'єкт дослідження – інформаційні процеси передачі та обробки даних у безпроводних системах передачі інформації в умовах навмисних завад.

Предмет дослідження – методи, моделі та алгоритми адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, спрямовані на забезпечення цілісності інформації у безпроводних системах передачі даних.

Методи дослідження. Для розв’язання поставлених у дисертаційній роботі задач використано методи математичного та імітаційного комп’ютерного моделювання, методи алгоритмічного аналізу, методи теорії керування та теорії прийняття рішень, а також методи об’єктно-орієнтованого програмування.

Методи математичного моделювання застосовано для формалізації процесів передачі та обробки даних у безпроводних системах передачі інформації, побудови математичних моделей впливу завадових факторів на інформаційні процеси та встановлення залежностей між параметрами передачі і показниками цілісності даних.

Методи імітаційного комп’ютерного моделювання використано для створення комп’ютерної моделі системи передачі даних, дослідження її функціонування в умовах змінної завадової обстановки та проведення обчислювальних експериментів для оцінювання ефективності запропонованого методу адаптивного керування параметрами каналу передачі інформації.

Методи теорії керування та прийняття рішень застосовано під час розроблення алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних та формування критеріїв вибору параметрів системи в умовах змінної завадової обстановки.

Методи алгоритмічного аналізу використано при розробленні та дослідженні алгоритмів адаптивного вибору параметрів каналу передачі даних.

Методи об’єктно-орієнтованого програмування застосовано під час реалізації програмної моделі системи передачі даних та проведення комп’ютерних експериментів у середовищі MATLAB.

Зазначені методи забезпечили розроблення математичної моделі інформаційного процесу передачі даних, синтез алгоритму адаптивного керування параметрами системи та проведення комп’ютерного експерименту для оцінювання ефективності запропонованих рішень.

Наукова новизна одержаних результатів.

У дисертаційній роботі отримано нові наукові результати, що мають істотне значення для розвитку методів та моделей забезпечення цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації в умовах навмисних завад.

1. **Уперше** розроблено узагальнену імітаційну модель каналу передачі даних, яка, на відміну від відомих, забезпечує моделювання процесів передавання даних в умовах навмисних впливів шляхом інтеграції параметризованих моделей каналу, середовища та дестабілізуючих впливів, описаних сценаріями функціонування, у межах єдиної формалізованої структури, що дозволило реалізувати сценарно-орієнтоване моделювання функціонування каналу та обґрунтувати вибір адаптивних стратегій керування.

2. **Уперше** розроблено метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, який, на відміну від відомих, що базуються на статичних правилах або миттєвих енергетичних показниках каналу, забезпечує прийняття рішень шляхом комплексного врахування апріорної інформації про множину допустимих каналів, поточного стану каналу за метриками цілісності даних, часової динаміки функціонування системи та історії попередніх станів каналів із використанням механізму їх тимчасового блокування, що дозволило підвищити обґрунтованість вибору робочого каналу, зменшити ймовірність повторного використання непридатних частот і забезпечити цілісність даних у процесі передачі в умовах динамічного завадового середовища.

3. **Удосконалено** модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, який, на відміну від відомих, що базуються на аналізі лише поточних значень параметрів каналу, ґрунтується на інтегрованому використанні обчислювальної моделі каналу, метрик цілісності даних та часової динаміки й історії станів каналу шляхом реалізації багатокритеріального оцінювання його стану, що дозволило виявляти тенденції деградації каналу, зменшувати втрати інформації у перехідних режимах і підвищити ефективність передачі даних з точки зору їх цілісності.

4. Набув подальшого розвитку метод моделювання та оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадового впливу, який, на відміну від існуючих, розширено за рахунок використання сценарного моделювання завад та системи інтегральних і коєвних метрик стану системи (BER, PER, SNR, PoI), що забезпечує можливість кількісного порівняння ефективності алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних та вибору найбільш ефективної стратегії функціонування системи для заданого сценарію завадового впливу.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена імітаційна модель каналу передачі даних, яка є узагальненою та параметризованою, може використовуватися як інструмент для синтезу та дослідження адаптивних алгоритмів керування параметрами каналу передачі даних. Вона забезпечує відтворення динамічної взаємодії каналу з навмисним завадовим середовищем, що дозволяє оцінювати ефективність запропонованого методу адаптивного керування в різних сценаріях функціонування та обґрунтовувати вибір параметрів системи з урахуванням вимог до цілісності даних.

Запропонований метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних реалізований у складі програмно-апаратних засобів сучасних безпроводних систем зв'язку, зокрема на базі SDR-платформ. Його впровадження забезпечує організацію процесу прийняття рішень щодо вибору робочих каналів та параметрів передачі на основі багатокритеріальної оцінки стану каналу, що безпосередньо сприяє підвищенню стійкості функціонування системи та забезпеченню цілісності інформації під час передачі в умовах завадового впливу.

Удосконалений модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування використовується при розробленні програмного забезпечення систем передачі даних у вигляді модулів моніторингу, аналізу стану каналу та формування керуючих рішень. Його застосування дозволяє враховувати часову динаміку

процесів, інерційність системи та історію станів каналу, що забезпечує більш обґрунтоване керування параметрами передачі та зменшення втрат інформації у перехідних режимах.

Розроблений підхід до оцінювання стану каналу передачі даних, який базується на узагальненому поданні показників якості передачі та їх часової еволюції, використовується для побудови систем діагностики та контролю якості зв'язку. Це дозволяє не лише фіксувати факт деградації, а й аналізувати її розвиток у часі та враховувати накопичений вплив завад, що підвищує ефективність прийняття рішень у динамічному середовищі.

Розроблені моделі, методи та алгоритми застосовуються під час виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт для формування сценаріїв функціонування систем передачі даних, оцінювання їх стійкості до навмисних дестабілізуючих впливів та розроблення рекомендацій щодо підвищення ефективності їх функціонування.

Отримані результати дисертаційного дослідження впроваджено в діяльність ТОВ «Інформаційні системи захисту» та використано для аналізу стійкості процесів передачі даних, моделювання впливу дестабілізуючих факторів і розроблення рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування систем (акт про впровадження від 18.11.2025 р., Додаток В).

Результати роботи впроваджено в діяльність ТОВ «НІКС», де вони використовуються при дослідженні поведінки систем передачі даних у складних умовах функціонування, побудові сценаріїв моделювання та підготовці аналітичних матеріалів щодо оцінювання їх стійкості (акт про впровадження від 27.11.2025 р., Додаток В).

Результати дослідження впроваджено в освітній процес Національного університету «Чернігівська політехніка» та використано при викладанні дисциплін, пов'язаних із комп'ютерним моделюванням, аналізом інформаційних процесів і забезпеченням інформаційної безпеки (акт впровадження від 02.12.2025 р., Додаток В).

Особистий внесок здобувача

Основні наукові результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Постановка задачі дослідження, розроблення моделей і алгоритмів, створення імітаційної комп'ютерної моделі, проведення обчислювальних експериментів та аналіз отриманих результатів виконані автором самостійно.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, використано лише ті результати, які отримані здобувачем особисто. Участь інших авторів полягала у наукових консультаціях, обговоренні результатів та редагуванні тексту.

Особистий внесок здобувача у публікаціях за темою дисертації полягає в наступному.

У роботі [103] здобувачем сформульовано мету дослідження, проведено аналіз загроз застосування засобів радіоелектронної боротьби для каналів зв'язку БпЛА, запропоновано архітектуру системи зв'язку на основі технологій SDR та когнітивного радіо, обґрунтовано вибір апаратної платформи USRP B200mini, розроблено модель когнітивного радіоканалу та алгоритмічні принципи адаптивного керування параметрами передачі даних, включаючи вибір вільного частотного діапазону та зміну параметрів сигналу в умовах завад. Також здобувачем запропоновано використання нейронної мережі LSTM для аналізу спектральної активності, сформовано структурну модель каналу зв'язку БпЛА та узагальнену схему методу протидії засобам РЕБ, виконано аналіз результатів і сформульовано висновки.

У роботах [57; 58; 60], виконаних одноосібно, здобувачем розроблено теоретичні та алгоритмічні засади адаптивного керування параметрами безпроводових каналів передачі даних у нестационарному завадовому середовищі, сформовано імітаційні комп'ютерні моделі процесів передачі інформації, досліджено механізми спектрального маневрування та когнітивного доступу до радіочастотного ресурсу, проведено комп'ютерне моделювання та здійснено аналіз ефективності запропонованих методів.

У роботі [20] здобувачем сформульовано напрями підвищення ефективності інформаційних процесів у бездротових системах передачі даних та обґрунтовано доцільність застосування методів штучного інтелекту та нейронних мереж для оптимізації параметрів кодових конструкцій і підвищення достовірності передачі інформації в умовах нестаціонарних завадових впливів. Отримані результати стали теоретичною основою подальших досліджень, спрямованих на розроблення адаптивних методів забезпечення достовірності та цілісності передачі даних у безпроводових каналах керування БпЛА в умовах радіоелектронної протидії.

У працях [56; 61; 62], що засвідчують апробацію результатів дисертаційного дослідження, здобувачем сформульовано основні ідеї, підходи та результати досліджень щодо застосування когнітивного радіо, адаптивного вибору каналу зв'язку та спектрального маневрування у системах керування безпілотними апаратами в умовах радіоелектронної протидії.

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові результати дисертаційної роботи пройшли апробацію у процесі виконання науково-дослідної роботи, а також були представлені та обговорені на науково-практичних конференціях, тематика яких пов'язана з комп'ютерними науками, обробкою даних, комп'ютерним моделюванням і дослідженням безпроводних систем передачі інформації:

1) на I Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека ресурсів інформаційних систем» м. Чернігів 16-17 квітня 2020 року;

2) на XV Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «ЮНІСТЬ НАУКИ – 2025», м. Чернігів 23-25 квітня 2025 року;

3) на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «ITSec: Безпека інформаційних технологій», м. Тернопіль, 22-24 травня 2025 року.

Результати комп'ютерного моделювання, виконаного у середовищі MATLAB, використано при підготовці наукових доповідей, у яких висвітлено алгоритмічні аспекти адаптивного керування параметрами каналу передачі

інформації, формалізовані моделі впливу навмисних завад на інформаційні процеси та підходи до кількісного оцінювання цілісності даних у безпроводних системах зв'язку.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи повно викладені в 5 публікаціях, що включають: 4 наукові статті у фахових українських наукових журналах (з них 3 – одноосібні), 1 стаття у зарубіжному фаховому науковому журналі, а також 3 публікації у збірниках матеріалів наукових конференцій. Опубліковані праці відображають ключові результати дисертації, зокрема розроблені методи, моделі та результати обчислювальних експериментів.

Апробація результатів дослідження підтвердила коректність запропонованих підходів, їх відповідність сучасному рівню розвитку комп'ютерних наук та практичну значущість розроблених алгоритмічних і модельних рішень для дослідження цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Кожний розділ завершується висновками. Загальний обсяг дисертації становить 245 сторінок, з яких 188 сторінок основного тексту. Робота містить 48 рисунків, 8 таблиць. Список використаних джерел налічує 107 найменувань і займає 13 сторінок. Додатки викладено на 18 сторінках. Інші структурні елементи (титул, зміст, анотації тощо) займають 26 сторінок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ У БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ

1.1 Аналіз сучасних підходів до побудови безпроводових систем зв'язку із використанням технологій когнітивного та програмно-визначеного радіо

Явище «недовикористаного» спектра (також відоме як «спектральне забруднення» або «спектральний голод») виникає тоді, коли доступний радіочастотний спектр не використовується ефективно або повністю. Це явище зумовлене обмеженістю ресурсів спектра та неефективним розподілом радіочастотних діапазонів між різними користувачами [103].

Деякі частини радіочастотного спектра можуть бути зайняті пасивними користувачами, такими як радіозонди метеорологічних служб або супутникові системи, які не використовують спектр активно. Це може призводити до недоступності цих частин спектра для інших користувачів. Деякі користувачі можуть мати застарілі або незадіяні радіосистеми, які не використовують спектр повністю або ефективно. Наприклад, деякі системи можуть займати широкі діапазони спектра, але не використовувати його повністю через низьку щільність користувачів.

Відсутність ефективних механізмів координації та управління спектром може призводити до неправильного розподілу спектральних ресурсів між користувачами. Це може призвести до конфліктів та перекриття використання спектра, що зменшує ефективність його використання. Деякі частини спектра можуть бути заблоковані або зайняті певними користувачами або службами, що унеможливить доступ до них іншим користувачам. Це може бути через розподіл спектра за ліцензіями або певними обмеженнями на його використання.

Спостерігаючи, що в деяких місцях або в певний час доби до 70% розподіленого спектра може простоювати, Федеральна комісія з питань зв'язку (FCC) у діаграмі розподілу частот для Сполучених Штатів, показаній на рис. 1.1, нещодавно зробила рекомендації, що значно більшу спектральну ефективність

можна досягти за допомогою розгортання бездротових пристроїв, які можуть адаптуватися до основних користувачів, використовуючи доступні обмежені ресурси та мінімізуючи завади. Таким чином, розбіжність між розподілом спектра та його використанням свідчить про те, що цей дефіцит спектра можна подолати, дозволивши більш гнучке використання спектра [104].

UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS

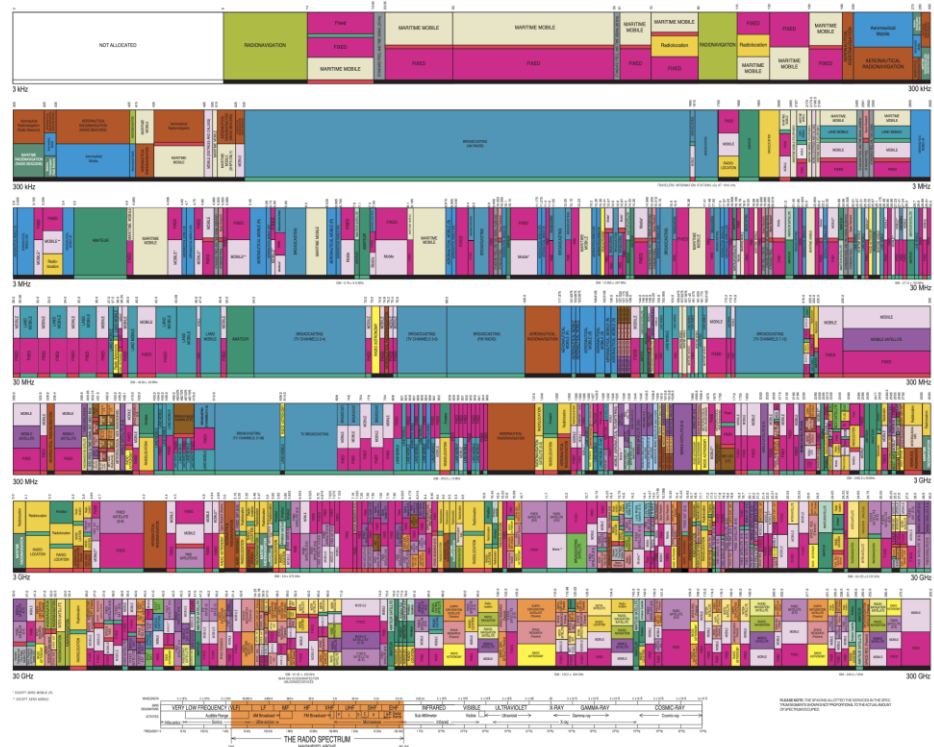


Рисунок 1.1 – Діаграма розподілу радіочастот Сполучених Штатів

1.1.1 Когнітивне радіо як підхід до подолання недовикористання спектра

Когнітивне радіо розглядається як програмно-керована система динамічного прийняття рішень щодо використання спектральних ресурсів в умовах невизначеності середовища.

Явище недовикористання спектра зумовлює зниження ефективності функціонування бездротових комунікаційних систем та створює обмеження для розвитку нових технологій. У зв'язку з цим розробляються підходи, зокрема технологія когнітивного радіо, що забезпечує більш раціональне використання доступного спектра з урахуванням змінних умов середовища та вимог користувачів.

Концепція когнітивного радіо є результатом багаторічних досліджень у галузі безпроводних комунікацій. Вперше термін «когнітивне радіо» було введено Джозефом Мітолою III у його дисертаційній роботі «Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio» у 1999 році [88]. У цій роботі автор описав радіосистему, здатну адаптувати свої параметри до змінних умов радіочастотного середовища на основі інтелектуальних алгоритмів. Подальший розвиток і формалізацію концепції когнітивного радіо здійснив Саймон Хейкін, який представив фундаментальну модель когнітивного радіо як «інтелектуальної» бездротової системи [84]. Подальше впровадження та стандартизація технологій когнітивного радіо здійснювалися за активної участі академічної спільноти, промислових компаній і міжнародних організацій стандартизації, зокрема IEEE [85].

Агентство перспективних досліджень оборони (DARPA) США розробило програму DARPA Adaptive RF Technology (ART Program) [73]. Метою цієї програми є розвиток нових технологій та інноваційних підходів до радіочастотних систем, що забезпечують адаптивність та високу ефективність в умовах складних та змінних радіочастотних середовищ. Основна ідея ART Program полягає в створенні нових радіочастотних систем, які здатні автоматично адаптуватися до змінних умов експлуатації та оптимізувати свою роботу для досягнення максимальної продуктивності. Це включає в себе розробку адаптивних алгоритмів, архітектури та компонентів радіосистем, що дозволяють швидко реагувати на зміни спектра та оптимізувати передачу та прийом сигналів.

ART Program має за мету покращити ефективність бездротових систем шляхом розробки нових технологій та методів. Це може включати розробку систем, здатних виявляти та аналізувати радіочастотне середовище, пристосовуватися до інтерференції та шуму, оптимізувати розподіл ресурсів спектра та забезпечувати надійну й швидку передачу даних. ART Program впроваджується через співпрацю з військовими дослідницькими лабораторіями, університетами, промисловими підприємствами та іншими науковими

установами з метою забезпечення інноваційних рішень та передових технологій у галузі радіочастотних систем.

Однією з основних цілей ART Program є створення радіочастотних систем, які забезпечують більшу адаптивність, ефективність та надійність в умовах змінних радіочастотних середовищ, особливо у випадках активного застосування противником засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Це може мати значний вплив на розвиток комунікаційних систем, військових застосунків, безпілотних літальних апаратів та багатьох інших галузей, де використовуються радіочастотні технології.

Оскільки розробка методу протидії засобам РЕБ є актуальним і складним завданням, багато дослідників та організацій, таких як військові дослідницькі лабораторії, університети та промислові компанії, працюють над цим напрямом [27; 101]. Їхні дослідження та розробки спрямовані на створення ефективних та надійних методів протидії, щоб забезпечити безперебійну роботу каналу зв'язку БпЛА в умовах впливу засобів РЕБ [17].

Вітчизняні дослідники також приділяють значну увагу питанням підвищення достовірності передачі інформації у безпілотних авіаційних комплексах в умовах навмисних та ненавмисних завад. Зокрема, у роботі С. В. Зайцева, О. О. Башинської, Ю. О. Камака, Б. В. Горлинського досліджено методи підвищення достовірності інформації сучасних безпілотних авіаційних комплексів шляхом застосування цифрових методів модуляції (QPSK, QAM, GFSK), розширення спектра сигналу методом псевдовипадкового переналаштування робочої частоти, а також рекомендовано використання завадостійкого кодування, зокрема турбокодів та кодів Ріда–Соломона [18]. Дослідження базується на результатах натурних експериментів і аналізі спектрограм каналів зв'язку реальних комплексів, що дозволило обґрунтувати ефективність комбінованого застосування цифрової модуляції та методів розширення спектра для підвищення стійкості до активних завад.

Засоби і технології РЕБ постійно розвиваються, щоб забезпечити військову перевагу в електронному бою. Ворог використовує різноманітні засоби

радіоелектронної боротьби, які призначені для перешкоджання діям або знищення робототехніки, включаючи БпЛА [72]. Протистояння між виробниками засобів зв'язку для БпЛА та виробниками засобів РЕБ є постійним процесом, що спонукає до постійних інновацій та вдосконалення технологій. Виробники засобів зв'язку стараються зробити свої системи якомога більш стійкими до завад та забезпечити найвищу якість передачі даних, в той час як виробники засобів РЕБ намагаються розробити нові технології, щоб забезпечити надійне блокування передачі даних [25; 34; 48].

Однак, в даний час спостерігається тенденція до вирішення виробниками засобів зв'язку цієї задачі протистояння шляхом використання технології когнітивного радіо. Крім того, що ця технологія сприяє більш раціональному використанню радіочастотного спектра, вона дозволяє швидко переключатися між різними діапазонами, змінювати частоти або напрямок передачі сигналу, що у свою чергу може суттєво зменшити вплив завад та підвищить надійність передачі даних [84].

Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що, незважаючи на значну кількість наукових праць, на сьогодні не існує універсальних методів протидії впливам засобів радіоелектронної боротьби на бездротові системи передачі даних, а ефективність відомих підходів суттєво залежить від типу завад, характеристик каналу, архітектури системи та умов її функціонування [24; 29; 78; 92; 93; 106; 107]. Технології SDR та когнітивного радіо можуть бути використані для створення оригінальних вітчизняних алгоритмів протидії й підвищити ефективність бездротових засобів передачі даних БпЛА.

Основна ідея розроблюваного методу полягає у тому, що когнітивне радіо може використовувати діапазони частот, які не пригнічуються засобами РЕБ противника і залишені ним для зв'язку своїх підрозділів, шляхом використання технології повторного використання спектра (spectral reuse) [59; 102]. Ця технологія дозволяє використовувати частоти, які не задіяні у даному місці в даний час, що сприяє підвищенню ефективності використання радіочастотного

спектра. Крім того, когнітивне радіо може аналізувати радіочастотний спектр в режимі реального часу та визначати доступні діапазони частот для передачі сигналу з максимальною ефективністю та мінімальним впливом на інші радіозасоби [38]. Саме це й дозволяє забезпечувати ефективне використання радіочастотного спектра та уникати завад для зв'язку.

У вітчизняних дослідженнях у сфері підвищення захищеності безпроводних систем керування БПЛА запропоновано низку технічних рішень, спрямованих на локальне підвищення стійкості каналів зв'язку [14; 15; 26; 30-32; 66]. Зокрема, у дисертаційній роботі Р.Б. Кутеня [33] розглянуто застосування додаткового мікроконтролерного модуля для реалізації алгоритмів захисту, використання частотного переналаштування відеоканалу, адаптивного керування потужністю передавача з метою зменшення ймовірності перехоплення сигналу, а також метод аварійного відновлення зв'язку із збереженням маршрутної інформації. Експериментально підтверджено можливість практичної реалізації зазначених рішень на малогабаритних безпілотних платформах.

В дисертаційній роботі О.А. Липського [37] запропонована методика адаптивного вибору параметрів сигналу в залежності від стану безпроводного каналу зв'язку, отриманого за критерієм максимуму пропускної спроможності при обмеженнях на інформаційну ефективність каналу зв'язку.

Разом із тим зазначені підходи орієнтовані переважно на удосконалення окремих режимів функціонування та не супроводжуються побудовою узагальненої математичної моделі каналу передачі даних як об'єкта адаптивного керування. Навмисний радіоелектронний вплив у них не формалізовано як окремий динамічний процес із параметризованими часовими, енергетичними та спектральними характеристиками, а механізми частотної перебудови та керування потужністю не інтегровані в єдиний алгоритм багатокритеріального вибору параметрів радіоканалу з урахуванням інерційності системи прийняття рішень та апаратних обмежень.

У даній дисертаційній роботі зазначені положення набули подальшого розвитку шляхом формалізації каналу передачі даних керування як нелінійної динамічної системи з керуванням та збуреннями, введення параметризованої моделі навмисних завад та інтеграції механізмів частотного переналаштування і керування потужністю в структуру адаптивного алгоритму. Запропонований підхід дозволяє перейти від реалізації окремих захисних функцій до системного адаптивного керування параметрами радіоканалу з використанням формалізованих метрик цілісності даних та часових циклів прийняття рішень, що забезпечує структурну та параметричну узгодженість математичної формалізації каналу з його імітаційною реалізацією під час моделювання навмисних завадових впливів.

Суттєвий внесок у розвиток теоретичних і прикладних засад адаптивного управління безпроводовими системами передачі інформації здійснено представниками наукової школи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Зокрема, у дисертаційній роботі В. М. Василенка [6] досліджено засоби адаптивного управління системою передачі інформації в умовах апіорної невизначеності та обґрунтовано принципи багаторівневої параметричної адаптації кодових конструкцій для забезпечення заданого рівня достовірності даних під впливом завад. У свою чергу, у роботі Б. В. Горлинського [13] розроблено методи забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних на основі адаптивного кодування з урахуванням змін стану каналу зв'язку. Отримані в зазначених дослідженнях результати формують системне теоретичне підґрунтя для побудови адаптивних телекомунікаційних систем, орієнтованих на підвищення завадостійкості та енергетичної ефективності.

На відміну від наведених робіт, у даній дисертації адаптивність розглядається в ширшому контексті когнітивного радіо та функціонування радіоканалу в умовах навмисної радіоелектронної протидії. Запропонований підхід інтегрує модель завадового впливу як окремий динамічний процес у структурі каналу передачі даних та поєднує алгоритми спектрального

зондування, багатокритеріального оцінювання стану каналу й частотного маневрування, що дозволяє забезпечити цілісність керуючих даних у нестационарному спектральному середовищі.

1.1.2 Програмно-визначене радіо

Розгляд концепції когнітивного радіо доцільно починати з аналізу програмно-визначеного радіо (Software Defined Radio, SDR), яке формує технологічну основу для реалізації адаптивних та інтелектуальних радіосистем. SDR представляє собою підхід до побудови засобів радіозв'язку, у якому функції оброблення сигналів, зокрема модуляція, демодуляція, фільтрація та синхронізація, реалізуються програмними засобами із мінімізацією жорстко фіксованих апаратних компонентів.

У межах даної концепції когнітивне радіо функціонує як розширення SDR-платформи, доповнюючи її механізмами аналізу середовища та адаптивного керування параметрами передачі. Практична реалізація таких систем базується на використанні процесорів загального призначення (GPP) та цифрових сигнальних процесорів (DSP), що забезпечує можливість динамічної зміни алгоритмів оброблення сигналів, впровадження методів інтелектуального прийняття рішень і адаптації до змінних умов функціонування [90].

На відміну від традиційних радіосистем, у яких кількість каналів і частотних діапазонів визначається на етапі проєктування та залишається незмінною протягом експлуатації, підхід SDR дозволяє здійснювати гнучке налаштування параметрів системи вже в процесі її роботи. У класичних системах відсутній механізм оперативного коригування характеристик відповідно до поточних умов середовища, що обмежує їх ефективність у динамічних сценаріях.

Запровадження SDR стало еволюційним розвитком традиційних радіотехнологій, у межах якого функціональність фізичного рівня радіостанції визначається програмним забезпеченням. Значна частина елементів радіотракту, включаючи фільтри, підсилювачі та інші компоненти оброблення сигналів, реалізується у вигляді програмних модулів, що виконуються на обчислювальних

платформах. Такий підхід забезпечує високу гнучкість конфігурації, спрощує модернізацію системи та створює передумови для реалізації складних адаптивних алгоритмів у сучасних інформаційних системах радіозв'язку [96].

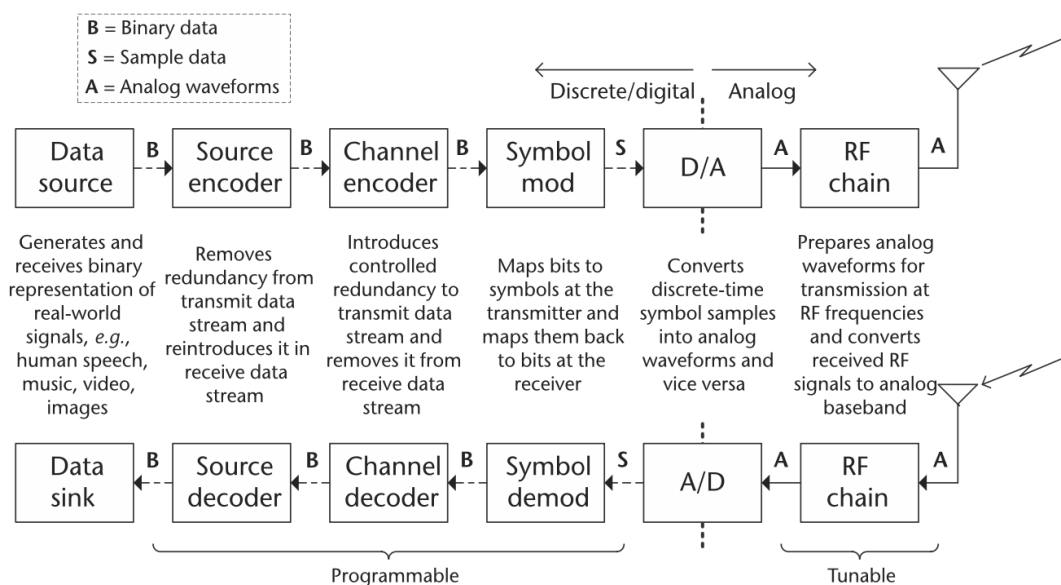


Рисунок 1.2 – Сучасна цифрова система зв'язку

Враховуючи складність платформи SDR та її відповідних компонентів, важливо розуміти обмеження конкретної платформи SDR і те, як різні проєктні рішення можуть вплинути на продуктивність кінцевого прототипу [50]. Наприклад, дуже бажано мати обробку базової смуги в реальному часі для зондування спектра і гнучких операцій передачі з високою обчислювальною пропускну здатністю і низькою затримкою [54; 82]. Однак, якщо мікропроцесор, який використовується в платформі SDR, недостатньо потужний для підтримки обчислювальних операцій цифрової системи зв'язку, необхідно переглянути або загальну конструкцію трансивера, або вимоги до низької затримки і високої пропускну здатності. В іншому випадку реалізація SDR не зможе працювати належним чином, що призведе до помилок передачі та низької продуктивності зв'язку [103].

1.1.3 Вплив дестабілізуючих факторів радіоелектронної природи на інформаційні процеси у безпроводних системах передачі даних

Застосування засобів радіоелектронної боротьби суттєво ускладнює функціонування безпілотних літальних апаратів, що використовують

безпроводні радіоканали для керування та передачі даних. Основними напрямками впливу є порушення каналу керування, деградація навігаційних сервісів (зокрема супутникових), а також зниження достовірності приймання телеметричної та службової інформації.

З позицій комп'ютерних наук радіоелектронний вплив доцільно розглядати як зовнішній дестабілізуючий фактор, що змінює параметри стану каналу передачі даних (SNR , BER , затримки, спектральну зайнятість тощо) та ускладнює задачу прийняття рішень у системі керування. У такій постановці задача протидії засобам РЕБ зводиться до формалізації поведінки каналу як об'єкта адаптивного керування в умовах невизначеності та нестационарності завадового середовища.

Одним із ключових етапів дослідження є моделювання спектральної активності засобів РЕБ у відповідному діапазоні частот. Метою такого моделювання є відтворення часових і частотних характеристик завадових сигналів для подальшого аналізу їх впливу на якість передачі даних. Процес моделювання включає:

- формалізацію параметрів завадової системи (потужність, ширина смуги, робочі діапазони, тип модуляції, часові характеристики);
- побудову математичної або алгоритмічної моделі спектральної активності, що описує розподіл енергії у частотно-часовому просторі;
- проведення імітаційних експериментів з метою оцінювання впливу завад на показники цілісності даних і функціональну стійкість системи керування.

У контексті когнітивного радіо важливим завданням є вибір вільного діапазону частот та адаптація параметрів передачі в разі деградації каналу. Критерії вибору альтернативного каналу можуть включати:

- оцінювання спектральної доступності та зайнятості діапазону;
- аналіз рівня інтерференції та завад;
- врахування регуляторних обмежень використання спектра;
- забезпечення необхідного рівня достовірності приймання даних.

Алгоритм зміни параметрів передачі передбачає:

- моніторинг стану поточного каналу та виявлення ознак деградації;
- адаптацію параметрів (частоти, потужності, швидкості передачі, типу модуляції);
- автоматичний вибір альтернативного каналу на основі результатів спектрального зондування.

Отримані результати аналізу використовуються для формування реалістичних сценаріїв навмисного інформаційного впливу та параметризації комп'ютерної моделі каналу передачі даних, що розробляється у подальших розділах.

У межах даної роботи пропонується метод прийняття рішень щодо зміни параметрів передачі, який базується на поєднанні інформації про рівень завад у поточному каналі, результатів спектрального зондування, заданих пріоритетів частотних діапазонів та історії попередніх вимірювань. Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивний механізм керування радіоканалом у нестаціонарному завадовому середовищі.

У перспективі зазначений метод може бути розширений за рахунок застосування інтелектуальних алгоритмів, зокрема методів машинного навчання, для прогнозування спектральної активності та оптимізації вибору робочих параметрів каналу.

1.1.4 Вимоги до радіоелектронних засобів безпроводних інформаційних систем

У сучасних безпроводних інформаційних системах до радіоелектронних засобів висувається комплекс вимог, спрямованих на забезпечення надійності, ефективності та стійкості функціонування каналів передачі даних в умовах динамічного середовища [42; 49]. До ключових належать вимоги енергоефективності, що визначають тривалість автономної роботи системи, а також забезпечення високої чутливості приймального тракту для підтримання стабільного зв'язку на значних відстанях.

Важливою характеристикою є підтримка широкого діапазону робочих частот, що створює передумови для гнучкого вибору каналів передачі та реалізації адаптивних стратегій керування спектром. Одночасно радіоелектронні засоби повинні забезпечувати електромагнітну сумісність, бути стійкими до зовнішніх завад та не створювати дестабілізуючого впливу на інші компоненти системи.

З позицій забезпечення інформаційних процесів визначальними є вимоги до швидкості передачі даних та достовірності приймання інформації, що безпосередньо впливають на якість функціонування систем реального часу. Висока ймовірність коректного приймання повідомлень є критичною для підтримання цілісності даних у складних умовах завадового середовища.

Крім того, радіоелектронні засоби повинні забезпечувати інтеграцію з іншими підсистемами, зокрема сенсорними, навігаційними та керуючими, що формує єдину інформаційну систему з узгодженими параметрами обміну даними.

З точки зору комп'ютерних наук зазначені вимоги трансформуються у вимоги до обчислювальних ресурсів, часових характеристик оброблення інформації та програмної підтримки адаптивних алгоритмів, які забезпечують динамічне налаштування параметрів передачі в умовах невизначеності та нестационарності середовища функціонування.

1.2 Огляд апаратної платформи експериментального дослідження безпроводних інформаційних систем

У межах досліджень, спрямованих на розроблення адаптивних методів керування параметрами передачі даних в умовах дії дестабілізуючих факторів, сформовано експериментальний стенд, який забезпечує можливість комплексного тестування, збору даних та аналізу адаптивної поведінки каналу передачі даних в умовах завадового середовища. Використана апаратна платформа програмно-визначеного радіо розглядається як референтна основа для врахування обмежень реального часу, пропускну здатності та

обчислювальних ресурсів, що впливають на реалізованість алгоритмів адаптивного керування, а не як самостійний об'єкт дослідження.

Апаратну основу експериментального стенду становлять програмно-конфігуровані радіопристрої класу SDR виробництва компанії Ettus Research – USRP B200mini та USRP B210. Застосування двох апаратних платформ із різними архітектурними можливостями дозволяє провести порівняльний аналіз впливу апаратних характеристик на ефективність реалізації алгоритмів адаптивного керування, швидкодію оброблення сигналів та здатність системи до функціонування в умовах інтенсивних завад.

Зазначені SDR-пристрої використовуються як універсальні радіотрансівери для реалізації інформаційних процесів передачі даних, зокрема адаптивного вибору робочої частоти, реагування на деградацію каналу, спектрального аналізу середовища та моделювання сценаріїв порушення зв'язку. Використання різних конфігурацій апаратної платформи дає змогу дослідити вплив архітектури радіотракту на ефективність адаптивних алгоритмів, а також оцінити компроміс між складністю обчислень, швидкістю реакції та якістю інформаційного обміну.

1.2.1 SDR-платформа USRP B200mini

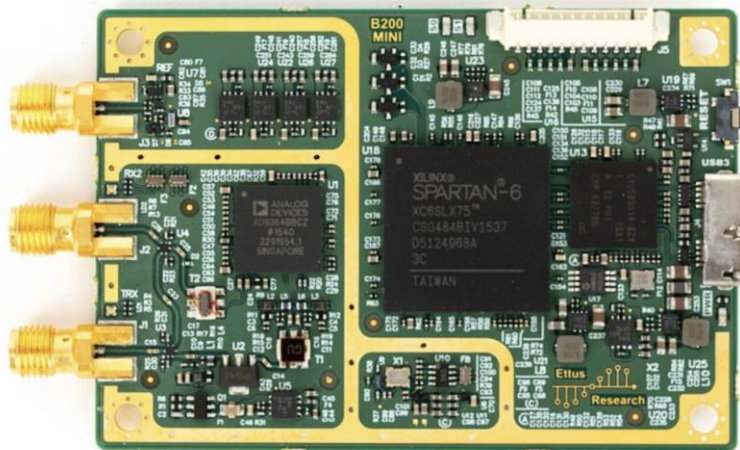


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд плати USRP B200mini

Платформа USRP B200mini (рис. 1.3) побудована на базі радіочастотної мікросхеми AD9364 та забезпечує реалізацію повнодуплексного режиму

передачі даних у межах одного приймально-передавального тракту (рис. 1.4). Архітектура пристрою орієнтована на компактні та енергоефективні системи, що працюють в умовах обмежених обчислювальних ресурсів і пропускної здатності інтерфейсів.

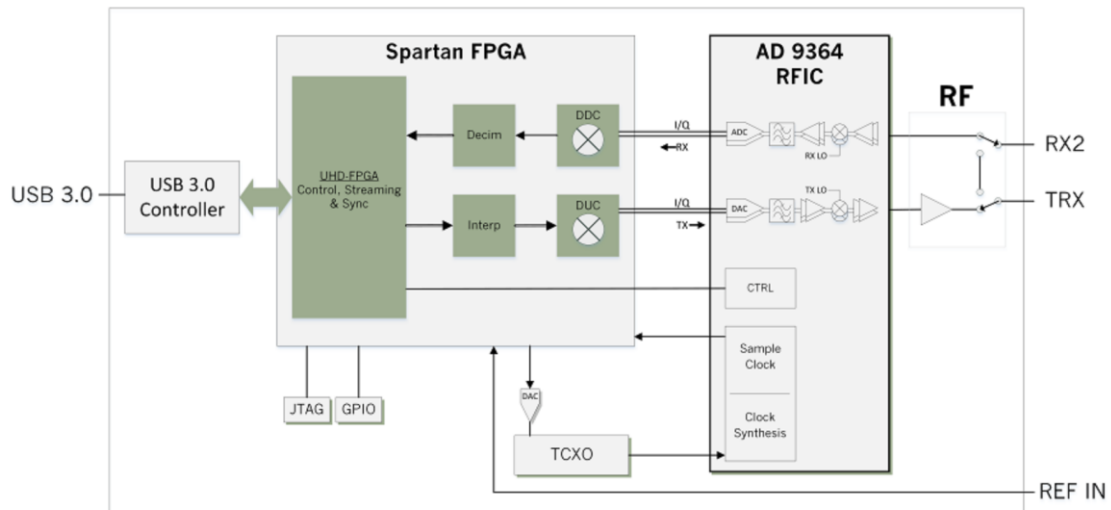


Рисунок 1.4 – Блок-схема USRP B200mini

До основних технічних характеристик належать підтримка одного дуплексного каналу передачі (1 Tx / 1 Rx), робочий діапазон частот від 70 МГц до 6 ГГц, максимальна смуга пропускання до 56 МГц, а також використання інтерфейсу USB 3.0 для взаємодії з обчислювальною підсистемою. Невеликі габарити та маса пристрою визначають його придатність для використання у мобільних та вбудованих інформаційних системах.

У межах експериментального дослідження дана платформа використовується як базова конфігурація для реалізації каналу передачі даних з обмеженими можливостями адаптивного аналізу середовища. Зокрема, вона застосовується для дослідження алгоритмів керування параметрами передачі в умовах часткового або повного обмеження спектрального зондування, а також для оцінювання ефективності простих стратегій вибору частотного ресурсу на основі наперед визначених правил.

Таким чином, USRP B200mini виступає як референтна платформа для аналізу мінімально необхідного функціоналу адаптивної системи передачі даних,

що дозволяє дослідити вплив обмежень апаратної архітектури на якість інформаційних процесів.

1.2.2 SDR-платформа USRP B210



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд плати USRP B210

Платформа USRP B210 (рис. 1.5), побудована на основі мікросхеми AD9361, характеризується наявністю двох незалежних приймально-передавальних трактів, що суттєво розширює можливості реалізації складних алгоритмів оброблення сигналів та адаптивного керування (рис. 1.6). Така архітектура дозволяє одночасно виконувати операції передачі даних і аналізу спектрального середовища без взаємного впливу.

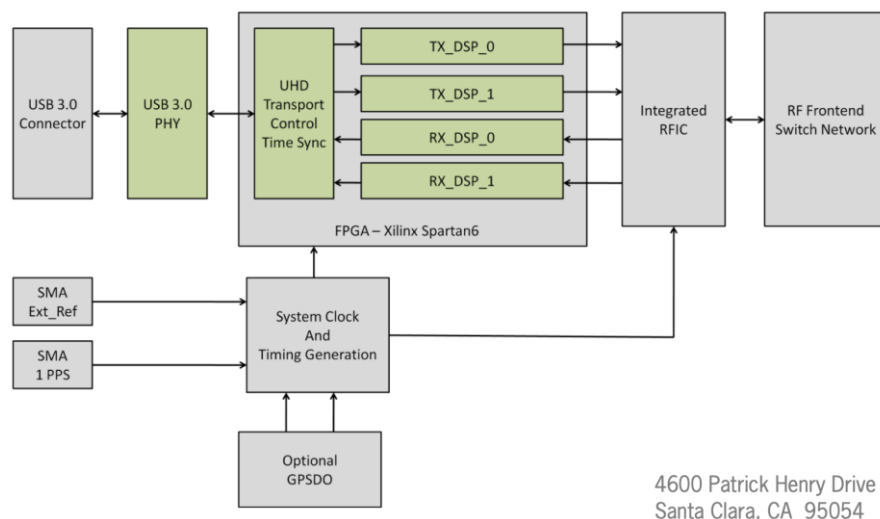


Рисунок 1.6 – Блок-схема USRP B210

Основні технічні параметри платформи включають підтримку двох каналів передачі (2 Tx / 2 Rx), робочий діапазон частот від 70 МГц до 6 ГГц, максимальну смугу пропускання до 56 МГц, інтерфейс USB 3.0, а також підтримку технології МІМО. Розширені апаратні можливості супроводжуються збільшенням габаритів і енергоспоживання, що зумовлює необхідність урахування обчислювальних та енергетичних обмежень під час проєктування системи.

У рамках дослідження USRP B210 використовується як платформа для реалізації повнофункціональних адаптивних алгоритмів, зокрема методів когнітивного аналізу спектра, динамічного вибору частотних ресурсів та резервування каналів передавання. Наявність двох незалежних трактів дозволяє виконувати фонове спектральне зондування паралельно з передаванням даних, що забезпечує можливість оперативного реагування на зміну стану середовища.

Крім того, дана платформа забезпечує реалізацію алгоритмів «гарячого» перемикавання каналів, перевірку стану альтернативних частот без переривання основного інформаційного потоку, а також підтримку рознесених режимів передачі та прийому даних. Це створює передумови для дослідження складних сценаріїв функціонування адаптивних систем у нестаціонарному завадовому середовищі.

Таким чином, USRP B210 розглядається як експериментальна база для оцінювання ефективності інтелектуальних та адаптивних методів керування інформаційними процесами в безпроводних системах передачі даних.

1.2.3 Наземний сегмент експериментального комплексу

Наземний сегмент експериментального комплексу є ключовим компонентом дослідницької інфраструктури, призначеної для аналізу функціонування безпроводних каналів передачі даних в умовах дії дестабілізуючих факторів. Він забезпечує керування процесами передачі даних, моніторинг якості інформаційного обміну, формування завадового середовища та взаємодію з SDR-платформами, що використовуються в межах експерименту. Архітектура наземного сегмента побудована таким чином, щоб забезпечити

гнучкість конфігурування, можливість масштабування та підтримку детального логування параметрів інформаційних процесів.

Функціонально наземний сегмент реалізує керування передаванням даних у реальному часі, збір і оброблення телеметричної інформації, спектральний моніторинг середовища, а також генерацію керованих завад для відтворення різних сценаріїв впливу на канал зв'язку. Додатково забезпечується реєстрація подій, пов'язаних із деградацією каналу, перемиканням частот та зміною режимів роботи системи, а також узгодження часових міток між усіма елементами експериментального комплексу.

Апаратна складова наземного сегмента включає обчислювальну платформу загального призначення, SDR-трансивери для передачі та прийому сигналів, засоби підсилення та антенно-фідерні системи, а також джерела високостабільної тактової частоти для синхронізації. За необхідності використовується окремий модуль генерації завад, який дозволяє формувати сигнали різної структури та інтенсивності з можливістю динамічного керування їх параметрами.

На рівні програмного забезпечення реалізовано розподілену систему, що включає модулі керування передаванням даних, аналізу якості каналу, спектрального моніторингу та генерації завад. Підсистема оцінювання якості забезпечує вимірювання параметрів сигналу, зокрема відношення сигнал/шум, рівня прийнятого сигналу та коефіцієнта бітових помилок у реальному часі, а також виконує їх логування та виявлення ознак деградації каналу. Паралельно функціонує модуль спектрального аналізу, який дозволяє оцінювати зайнятість частотного ресурсу та виявляти сторонні джерела сигналів.

Обмін даними між компонентами комплексу здійснюється із використанням поточкових протоколів передачі, що підтримують як низькорівневий обмін IQ-даними, так і передачу структурованої службової інформації. Для підвищення безпеки інформаційного обміну передбачено використання механізмів криптографічного захисту інформації з попередньою ініціалізацією параметрів сеансу.

Наземний сегмент забезпечує можливість як оперативного, так і постекспериментального аналізу поведінки системи, включаючи оцінювання частоти перемикань каналів, часу реакції на завади, ефективності алгоритмів адаптації та характеристик відновлення зв'язку після деградації. Таким чином, він виконує не лише функції керування, а й роль аналітичної підсистеми, що забезпечує дослідження інформаційних процесів у безпроводних системах передачі даних в умовах нестаціонарного завадового середовища.

1.3 Алгоритмічні принципи реалізації когнітивного радіо на базі заданої SDR-платформи

Когнітивне радіо – це парадигма систем зв'язку на основі SDR, яка фокусується на використанні високоманеврених, інтелектуальних бездротових платформ для автономного вибору і точного налаштування параметрів роботи пристрою на основі переважаючих умов радіо- і мережевого середовища [76; 96].



Рисунок 1.7 – Базовий когнітивний цикл

На рисунку 1.7 представлено три онлайн-когнітивні завдання, які виконує когнітивне радіо. Перше і друге завдання виконуються в приймачі, а третє – в передавачі [84]:

1. Аналіз радіооточення, що включає: оцінку завадової температури радіосередовища та виявлення вільних частотних каналів.

2. Ідентифікація каналу, яка включає: оцінку інформації про стан каналу (CSI) та прогнозування пропускної здатності каналу для використання передавачем.

3. Управління потужністю передавача та динамічне управління спектром.

Сутність когнітивного радіо полягає в тому, що бездротові пристрої можуть обстежувати радіочастотний спектр та аналізувати його в режимі реального часу [80]. На основі зібраних даних про наявні радіочастотні діапазони, бездротовий пристрій може приймати рішення щодо використання вільного спектрального діапазону, оптимальних параметрів передачі та інших характеристик бездротової мережі [74].

У дисертаційній роботі В.Б. Янишина досліджено моделі та алгоритми управління радіочастотним ресурсом у когнітивних радіомережах, зокрема алгоритми вибору частотних каналів на основі спектрального сканування, оцінювання зайнятості каналу та прогнозування його стану [70]. Отримані результати спрямовані на підвищення ефективності використання спектру та оптимізацію доступу до нього у мережах із вторинними користувачами.

Водночас у роботі В.Б. Янишина основну увагу зосереджено на задачах управління спектральним ресурсом у межах когнітивних радіомереж, зокрема на процедурах спектрального зондування, оцінювання доступності каналів та алгоритмах їх вибору. У межах такого підходу навмисний радіоелектронний вплив не виділяється як окремий параметризований динамічний процес, що задається сценарно та аналізується з позицій стійкості каналу передачі інформації.

У даній дисертаційній роботі отримані підходи до спектрального аналізу та вибору частотного ресурсу розвинено у напрямі побудови узагальненої комп'ютерної моделі радіоканалу керування БпЛА, що інтегрує механізми спектрального маневрування, часові цикли адаптації та модель навмисних завад,

забезпечуючи дослідження стійкості процесу передачі керуючих даних в умовах активної протидії.

Спільне використання спектра забезпечує безперешкодний доступ до одних і тих самих смуг частот для різних категорій користувачів. Найпоширенішим прикладом спільного використання спектру в мережах когнітивного радіо є повторне використання телевізійних діапазонів: спектр, виділений телевізійним мовникам – первинним користувачам (primary users, PU) може використовуватись для інших бездротових комунікацій вторинних користувачів (secondary users, SU), що й було представлено у 2009 році в якості стандарту бездротових регіональних мереж (Wireless Regional Area Network, WRAN) IEEE 802.22 [85, 98, 67]. Робота вторинних користувачів є досить нестабільною через абсолютні привілеї PU та взаємовиключний доступ до спектра. Вирішенням цієї задачі є динамічний доступ до спектра, який забезпечує одночасну роботу PU та SU, визначаючи вільні частотні канали і дозволяючи пристроям зв'язуватися у вільних частинах спектра [46, 75]. Штучний інтелект використовується для обробки сигналів і прийняття рішень стосовно вибору спектральних смуг, потужності передавача, часового й просторового рознесення радіосигналів, швидкості передачі символів і типу модуляції. Все це визначає можливість повторного використання спектра за умови, що інформація про PU і сигнали відсутня [103].

Питання впровадження стандарту IEEE 802.22 у системах радіозв'язку спеціального призначення розглянуто у роботі М.О. Масесова, І.В. Панченка, Л.О. Бондаренка, В.В. Малих [40]. Проаналізовано архітектуру когнітивної радіосистеми, особливості фізичного та MAC-рівнів стандарту 802.22, а також запропоновано спрощену модель когнітивного радіо з блоками сприйняття, навчання та виконання. Робота акцентує увагу на можливостях підвищення стійкості та раціонального використання спектра в системах спеціального призначення.

Іншими задачами, зазначеними у [103], є аналіз радіооточення та адаптація до передачі PU. Деякі PU мають специфічні схеми передачі, наприклад,

заздалегідь визначений час і тривалість використання спектра, як, наприклад, телевізійні станції, або можуть мати випадковий доступ до каналу, як, наприклад, державні служби. У цей час протокол CR MAC може визначити характер PU і адаптувати свою передачу, щоб уникнути завад для себе і запобігти конфлікту з PU [70]. Але ця задача у даній роботі не розглядатиметься, тому що працювати на каналах, вже придушених засобами РЕБ, не планується.

Серед вітчизняних досліджень у сфері когнітивного радіо, динамічного доступу до спектра та адаптивних радіосистем окремої уваги заслуговують роботи, присвячені формалізації процесів спектрального моніторингу та прийняття рішень в умовах невизначеності [45; 46; 91]. Зокрема, у дисертаційному дослідженні Я.Я. Обіхода розроблено методи підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу на основі принципів когнітивного радіо, включаючи механізми спектрального зондування, оцінювання зайнятості частотних діапазонів та алгоритмічної адаптації параметрів передачі [47].

У зазначеній роботі сформульовано підхід до реалізації систем динамічного доступу до спектра, орієнтованих на мінімізацію завад первинним користувачам та підвищення пропускну здатності мереж типу WRAN. Водночас основна увага приділяється питанням ефективності спектрального використання у цивільних телекомунікаційних системах.

На відміну від наведених підходів, у даній дисертаційній роботі принципи когнітивного радіо та спектрального зондування розвиваються у напрямі забезпечення завадостійкості безпроводних каналу передачі даних цільової системи (БПЛА) в умовах навмисних дестабілізуючих впливів. Запропонований підхід поєднує механізми широкодіапазонного спектрального моніторингу, алгоритмічного вибору робочої частоти та адаптивної зміни параметрів сигнально-кодових конструкцій із формалізованою комп'ютерною моделлю каналу передачі даних, що дозволяє враховувати сценарії активної радіоелектронної протидії.

Таким чином, у даній роботі здійснюється подальший розвиток ідей динамічного доступу до спектра та когнітивного радіо шляхом їх адаптації до задач підвищення функціональної стійкості каналів передачі даних мобільних систем в умовах навмисних дестабілізуючих впливів.

1.4 Етапи формалізації та програмної реалізації імітаційної моделі адаптивного каналу передачі даних для цільової системи

Створення імітаційної моделі адаптивного каналу передачі даних для цільової системи передбачатиме виконання наступних етапів:

1. Визначення характеристик каналу (рівня шуму, спотворень та втрат сигналу в каналі зв'язку).
2. Визначення характеристик передавача (потужність, частота передачі, модуляція та кодування).
3. Визначення характеристик приймача (чутливість, діапазон частот, алгоритми демодуляції та декодування).
4. Моделювання поведінки засобів пригнічення (моделювання спектральної активності засобів РЕБ противника у відповідному діапазоні частот).
5. Використання алгоритмів керування каналом – визначення критеріїв для вибору вільного діапазону частот та визначення алгоритму для зміни параметрів передачі даних в разі постановки завад.
6. Використання отриманих параметрів каналу для імітаційного моделювання передачі даних в цільовій системі.
7. Аналіз отриманих результатів (для оцінювання ефективності роботи цільової системи в різних умовах).

Враховуючи вищевказані етапи, можна створити імітаційну модель каналу когнітивного радіо для цільової системи. Проте слід зазначити, що створення точної моделі каналу може бути досить складним завданням, оскільки потребує збору значної кількості даних та їх обробки. Тому, в більшості випадків,

застосовуються апроксимації та спрощені моделі, які дозволяють забезпечити достатню точність [22; 23;102].

Діапазон радіочастот, що використовується для БПЛА, може різнитись залежно від конкретної моделі і її призначення. Зазвичай БПЛА використовують частотний діапазон від 900 МГц до 5,8 ГГц, який забезпечує достатню швидкість передачі даних і надійне з'єднання між пультом управління та БПЛА [3; 94]. Для безпеки в повітрі і уникнення перебоїв в роботі інших систем радіозв'язку, у багатьох країнах є обмеження на використання певних діапазонів радіочастот для БПЛА. Наприклад, у США і Канаді для комерційного використання БПЛА дозволено використовувати лише діапазони 900 МГц, 2,4 ГГц і 5,8 ГГц. У Європі та більшості країн Азії дозволені діапазони частот від 433 МГц до 5,8 ГГц.

Швидкість передачі інформації, необхідна для БПЛА, може значно відрізнятись в залежності від його завдань та можливостей. Для деяких застосувань, таких як зйомка відео або фотографій, достатньо невеликої швидкості передачі даних. У інших випадках, наприклад, для виконання місій зі збору та передачі розвідувальної інформації, може бути необхідна велика швидкість передачі даних. Зазвичай швидкість передачі даних для БПЛА варіюється від кількох мегабіт на секунду (Мбіт/с) до кількох гігабіт на секунду (Гбіт/с), залежно від конкретних потреб і можливостей БПЛА. Наприклад, для передачі відео високої чіткості (HD) потрібна швидкість передачі даних не менше 6 Мбіт/с, а для передачі відео у форматі 4K – не менше 20 Мбіт/с. Однак, для розвідувальних БПЛА можуть використовуватись не тільки передача відео, а й передача інших типів даних, таких як звукові, теплові або інші сенсорні дані. У таких випадках швидкість передачі даних може бути меншою, залежно від типу даних та їх обсягу.

У сучасних БПЛА для передачі зображень використовується цифрова модуляція, що дозволяє передавати зображення у високій якості та ефективно використовувати доступну пропускну здатність каналу зв'язку. Одним із найпоширеніших типів модуляції для передачі зображень є метод модуляції з фазовим зсувом (Phase Shift Keying, PSK). PSK дозволяє передавати цифрові дані

шляхом зміни фази несучої хвилі. Залежно від конкретних вимог та характеристик системи зв'язку в БпЛА, можуть використовуватись різні варіації PSK, такі як Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), або 8-Phase Shift Keying (8-PSK). Кожен з цих варіантів PSK має різну швидкість передачі даних.

Характеристики приймача БпЛА можуть варіюватись залежно від конкретних моделей і виробників БпЛА, а також вимог до системи зв'язку й можуть включати наступне:

- чутливість, вказує на мінімальну потужність сигналу, яку може сприймати приймач із заданою якістю сигналу;
- робочий діапазон, це частотний діапазон, в межах якого приймач може працювати (в залежності від типу БпЛА та його застосування, цей діапазон може бути різним);
- селективність, це характеристика, яка вказує на здатність приймача розрізняти й приймати сигнали з різних джерел або каналів (висока селективність дозволяє приймачу обирати конкретні сигнали і виключати небажані);
- завадозахищеність, це властивість, що описує здатність приймача працювати в умовах наявності електромагнітних завад або шуму (висока завадозахищеність дозволяє приймачу ефективно фільтрувати шум та завади і отримувати чистий сигнал);
- швидкість прийому даних, це число, яке вказує на швидкість передачі даних, яку приймач може обробляти. Швидкість прийому даних може варіюватись залежно від специфікацій приймача та вимог конкретної системи зв'язку.

Вибрані цільові апаратні платформи USRP B200mini та USRP B210 цілком задовольняють вимоги щодо необхідного діапазону радіочастот, швидкості передачі даних та миттєвої смуги пропускання, а також підтримують всі необхідні типи модуляції [39]. Трансивери AD 9361 та AD 9364 оптимізовані для

застосування у радіомодулях, що мають невеликі розміри, малу вагу й низьке енергоспоживання.

Потужність передавача БПЛА може значно варіюватися в залежності від типу та розміру БПЛА, особливостей його застосування та регуляторних обмежень. Зазвичай, БПЛА використовують передавачі з низькою потужністю для забезпечення компактності, низького споживання енергії та довгого часу польоту.

1.5 Застосування нейронних мереж і адаптивного кодування в когнітивному радіо

У межах даної дисертаційної роботи нейромережеві методи та адаптивне завадостійке кодування не є складовими реалізованої імітаційної моделі адаптивного каналу передачі даних, однак розглядаються як перспективні напрями подальшого розвитку запропонованого підходу [20]. Зокрема, архітектури типу LSTM можуть бути використані для прогнозування стану спектрального середовища, оцінювання динаміки зміни рівня завад та підтримки прийняття рішень у задачі адаптивного керування параметрами каналу передачі даних [55; 58].

У представленій дисертаційній роботі адаптивність забезпечується алгоритмічними методами спектрального зондування, багатокритеріального оцінювання стану каналу передачі даних та процедурою частотного маневрування. Водночас подальша інтеграція адаптивного завадостійкого кодування, зокрема турбокодів, може істотно підвищити енергетичну ефективність системи та зменшити ймовірність бітових помилок у складних завадових умовах, що підтверджено в роботах [6, 13, 63].

Перспективним є поєднання частотного маневрування з адаптивною перебудовою кодових конструкцій [56]. Зокрема, у когнітивному радіоканалі можливе використання апіорної інформації про момент переходу на альтернативну робочу частоту (результат прийнятого алгоритмічного рішення). Така інформація може бути використана для попередньої ініціалізації параметрів

декодування, адаптації швидкості кодування та корекції алгоритмів синхронізації. У цьому випадку процес входження системи в синхронізм після частотного маневру може бути суттєво прискорений за рахунок зменшення часу навчання декодера та скорочення фази початкової адаптації.

Поєднання адаптивного турбокодування з механізмом прогнозованого частотного перемикання створює передумови для реалізації проактивної стратегії керування: кодова конструкція може змінюватися не лише реактивно, відповідно до вимірюваного BER або SNR , а й випереджально – на основі очікуваної деградації каналу або запланованого маневру частоти [99]. Це дозволяє мінімізувати втрати даних у перехідних режимах і зменшити тривалість нестійких фаз функціонування радіоканалу. Модель інформаційного тракту БпЛА з використанням технологій програмно-визначеного радіо, когнітивного радіо, завадостійкого кодування та нейронних мереж наведена на рисунку 1.8.

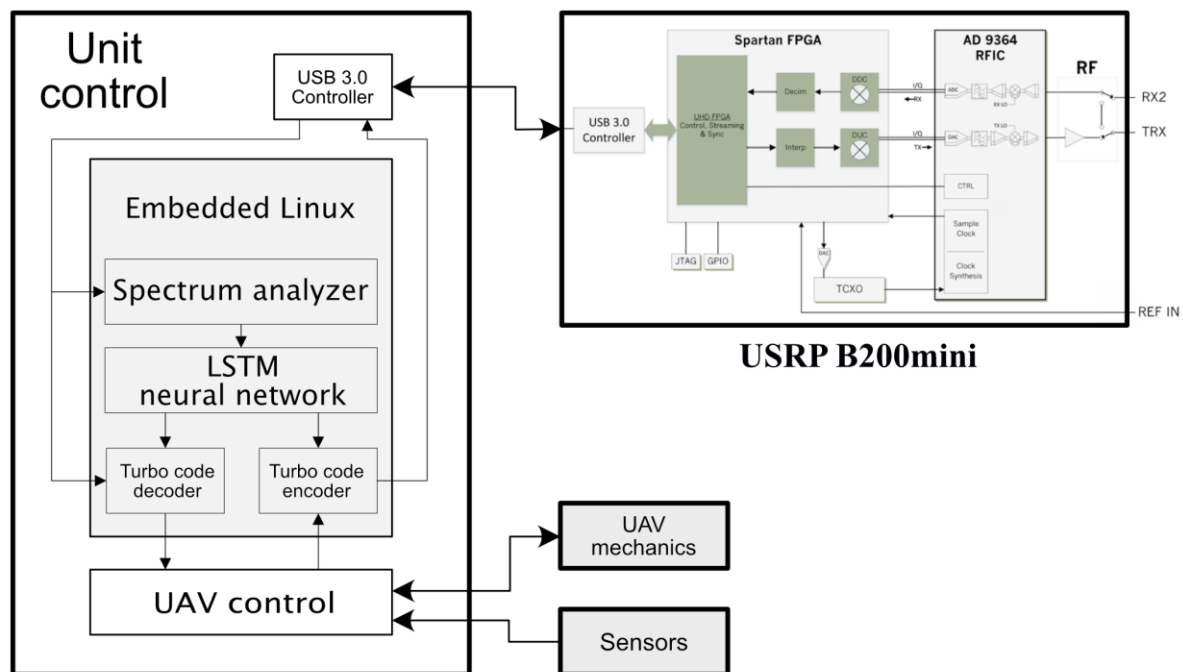


Рисунок 1.8 – Модель інформаційного тракту БпЛА з використанням технологій програмно-визначеного радіо, когнітивного радіо, завадостійкого кодування та нейронних мереж

На відміну від робіт, у яких адаптивність розглядається переважно на рівні кодових конструкцій [6, 13, 63], у даній дисертаційній роботі базовим рівнем

адаптації є керування параметрами каналу передачі даних як динамічної системи в умовах навмисного дестабілізуючого впливу. Водночас запропонована модель допускає розширення шляхом інтеграції адаптивних схем кодування, що забезпечує узгодженість математичної моделі каналу, алгоритмів керування та перспективних механізмів підвищення цілісності даних.

1.6 Етапи розробки методу протидії дестабілізуючим впливам у безпроводних інформаційних системах

Розробка методу протидії дестабілізуючим впливам у безпроводних інформаційних системах на основі технологій когнітивного радіо передбачає поетапне формування сукупності алгоритмічних, математичних та програмно-апаратних рішень, спрямованих на забезпечення цілісності та надійності передачі даних в умовах нестаціонарного середовища функціонування.

Початковим етапом є аналіз радіочастотного середовища як динамічного інформаційного простору, в якому відбувається передавання сигналів. На цьому етапі здійснюється виявлення джерел інтерференції, оцінювання спектральної зайнятості та визначення характеристик завадових впливів. Важливим завданням є класифікація сигналів та формалізація параметрів середовища у вигляді моделей, придатних для подальшого алгоритмічного опрацювання.

Наступний етап пов'язаний із розробкою адаптивних алгоритмів керування параметрами передачі. У межах цього етапу формуються підходи до динамічного вибору робочих частот, зміни типів модуляції, швидкості передачі та інших параметрів каналу. Основною метою є забезпечення безперервності інформаційного обміну за рахунок своєчасної реакції на зміну характеристик середовища та уникнення завадових діапазонів.

Ключовим компонентом методу є реалізація механізму адаптивного керування передаванням даних, який базується на оцінюванні поточного стану каналу та прийнятті рішень щодо зміни його параметрів. Такий механізм передбачає використання показників якості зв'язку, зокрема відношення

сигнал/шум, коефіцієнта бітових помилок та спектральної доступності, як вхідних даних для алгоритмів оптимізації.

Окремим напрямом є застосування методів завадостійкого кодування, зокрема багатокомпонентних турбокодів, які забезпечують підвищення достовірності передачі даних у складних умовах. Використання адаптивного кодування дозволяє узгоджувати рівень надлишковості з поточними характеристиками каналу, що є особливо важливим у випадку обмежених спектральних ресурсів.

Для підвищення ефективності адаптації доцільним є використання інтелектуальних методів оброблення інформації, зокрема нейронних мереж, які можуть застосовуватися для прогнозування змін параметрів каналу [57]. Інтеграція прогнозованої інформації в алгоритм керування дозволяє зменшити затримки реакції системи та підвищити її стійкість до швидкозмінних завадових впливів.

Завершальним етапом є верифікація та оцінювання ефективності розробленого методу. Для цього застосовуються методи математичного та імітаційного комп'ютерного моделювання, а також експериментальні дослідження у контрольованому середовищі. На цьому етапі здійснюється аналіз отриманих результатів, перевірка відповідності моделі реальним умовам функціонування та уточнення параметрів алгоритмів.

Розробка методу протидії дестабілізуючим впливам є комплексним міждисциплінарним завданням, що поєднує підходи теорії інформації, цифрової обробки сигналів, теорії керування та комп'ютерного моделювання. Запропонований підхід забезпечує формування адаптивної системи передачі даних, здатної підтримувати необхідний рівень цілісності інформації в умовах невизначеності та динамічної зміни параметрів середовища функціонування.

Структурна схема методу протидії радіоелектронним впливам у безпроводних системах передачі даних (на прикладі безпілотного літального апарата) із використанням технологій когнітивного радіо та нейронних мереж наведена на рис. 1.9 [62].

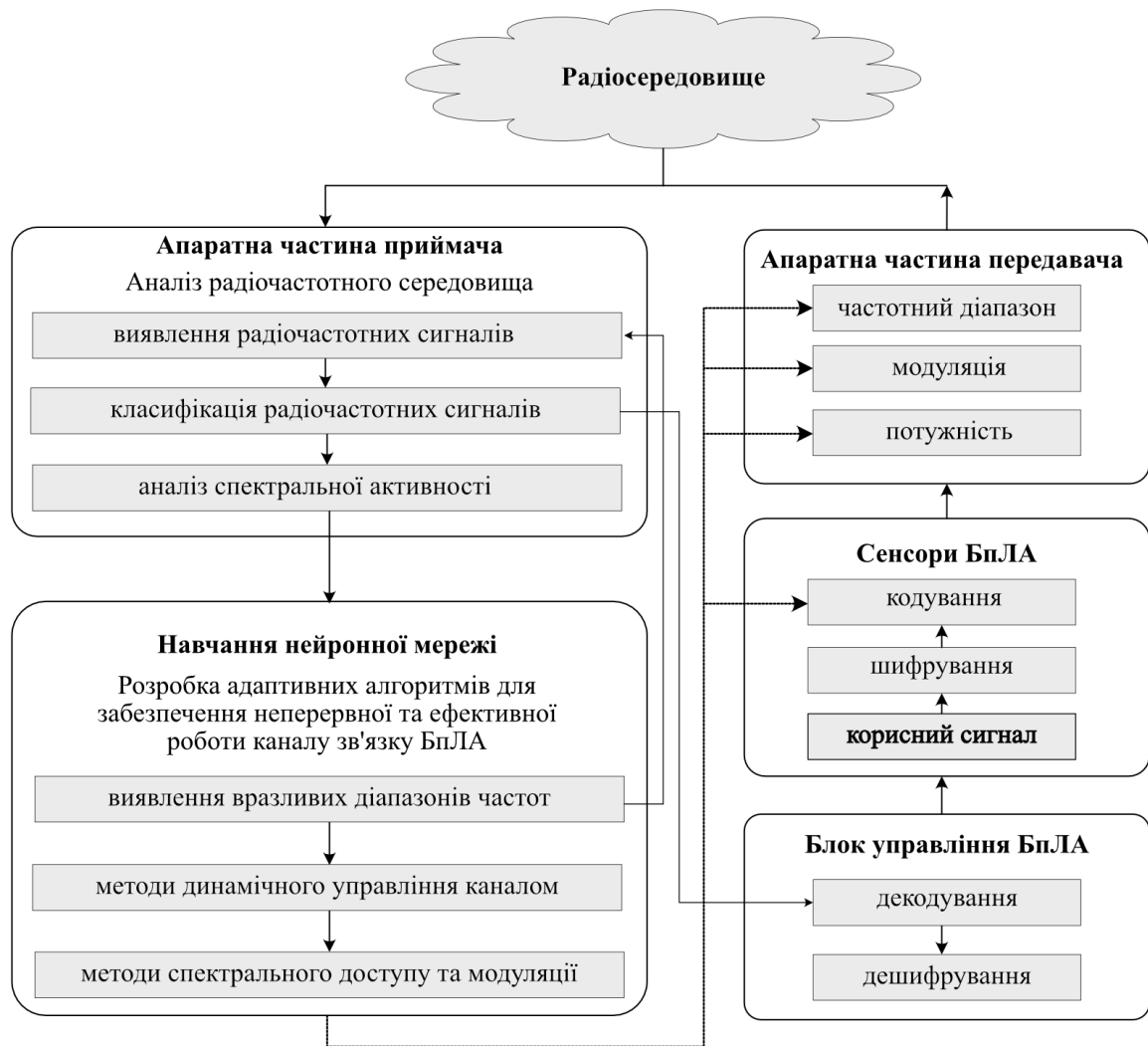


Рисунок 1.9 – Метод протидії радіоелектронним впливам у безпроводних системах передачі даних із використанням технологій когнітивного радіо та нейронних мереж

Висновки за розділом 1

1. У першому розділі здійснено системний аналіз сучасних підходів до побудови безпроводних систем передачі даних як складних динамічних систем оброблення інформації, що функціонують в умовах нестаціонарного завадового середовища. Встановлено, що ефективність таких систем визначається здатністю до адаптивної зміни параметрів передачі на основі аналізу стану каналу та середовища.

2. Розглянуто теоретичні та прикладні аспекти програмно-визначеного радіо як базової технологічної платформи для реалізації адаптивних

інформаційних систем. Обґрунтовано, що перенесення ключових функцій оброблення сигналів у програмну площину забезпечує гнучкість конфігурації, можливість оперативної зміни параметрів передачі та реалізацію складних алгоритмів аналізу спектра і прийняття рішень у реальному часі.

3. Проаналізовано вплив дестабілізуючих впливів на функціонування безпроводних каналів передачі даних на прикладі систем керування безпілотними літальними апаратами. Встановлено, що основними обмежувальними чинниками є нестационарність завадового середовища, обмеженість спектральних ресурсів та відсутність ефективних механізмів адаптації параметрів каналу, що зумовлює необхідність розроблення інтелектуальних методів керування.

4. Сформульовано вимоги до радіоелектронних засобів, які забезпечують функціональну стійкість систем передачі даних, зокрема вимоги до енергоефективності, спектральної гнучкості, завадостійкості, швидкодії та інтеграції з обчислювальними компонентами. Показано, що з позицій комп'ютерних наук ці вимоги трансформуються у задачі забезпечення достатніх обчислювальних ресурсів, мінімізації затримок оброблення та підтримки адаптивних алгоритмів.

5. Наведено огляд апаратної складової експериментального комплексу на базі SDR-платформ, що використовуються як референтна основа для врахування обмежень реальних систем при розробленні імітаційних комп'ютерних моделей та алгоритмів. Обґрунтовано доцільність використання таких платформ для реалізації процедур спектрального аналізу, адаптивного керування та експериментальної перевірки ефективності запропонованих підходів.

6. Описано етапи побудови методу протидії дестабілізуючим впливам, який базується на поєднанні принципів когнітивного радіо, адаптивного керування та інтелектуального аналізу даних. Визначено, що ключовими функціональними компонентами такого методу є моніторинг стану середовища передачі, аналіз параметрів каналу передачі даних, прогнозування змін та прийняття рішень щодо оптимізації параметрів передачі.

7. Узагальнення результатів проведеного аналізу дозволило встановити, що застосування технологій когнітивного та програмно-визначеного радіо створює науково-технічні передумови для побудови стійких до завад безпроводних каналів передачі даних. Отримані результати формують теоретичну основу для подальшого розроблення імітаційних комп'ютерних моделей, алгоритмів адаптивного керування та їх експериментальної верифікації у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ТА НАВМИСНИХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ

У розділі здійснено формалізацію процесу функціонування безпроводного радіоканалу передачі даних як об'єкта комп'ютерного моделювання в умовах навмисних дестабілізуючих впливів. Канал розглядається як динамічна система зі змінними параметрами стану, що підлягає алгоритмічному аналізу та подальшому адаптивному керуванню.

2.1 Особливості каналу передачі даних у безпроводних системах

Канал передачі даних у безпроводних системах є складним нестационарним об'єктом, характеристики якого суттєво змінюються в часі під впливом середовища функціонування та зовнішніх дестабілізуючих факторів. На відміну від провідних каналів, для безпроводних систем властивою є значна мінливість параметрів передачі, що зумовлюється рухомими об'єктами, обмеженістю радіочастотного ресурсу, наявністю завад та взаємним впливом різних джерел випромінювання. У таких умовах каналу передачі даних доцільно розглядати не лише як фізичне середовище поширення сигналів, а передусім як об'єкт комп'ютерного моделювання, в межах якого відбуваються інформаційні процеси передачі, спотворення та відновлення даних.

Однією з ключових особливостей каналу передачі даних безпроводних систем є його нестационарність, що проявляється у часовій зміні співвідношення сигнал/шум, рівня завад, затримок передачі та ймовірності виникнення помилок. Унаслідок цього миттєві значення показників якості передачі не завжди є репрезентативними для оцінювання стану каналу, а поведінка системи визначається сукупністю характеристик, накопичених у певному часовому інтервалі. Такий характер функціонування зумовлює необхідність врахування часової динаміки інформаційних процесів та відмову від статичних моделей каналу при дослідженні цілісності даних.

Важливою рисою каналу передачі даних у безпроводних системах передачі даних є підвищена чутливість до зовнішніх завад, які можуть мати як випадкову,

так і навмисну природу [69, 95]. Дія завад призводить до порушення структури передаваних повідомлень, зростання кількості бітових помилок та виникнення переривчастого характеру спотворень, коли помилки групуються у часові кластери. У таких умовах порушується цілісність керуючої та службової інформації, що негативно впливає на коректність обробки даних і загальну функціональну стійкість системи.

Особливістю каналу передачі даних, що розглядається в роботі, є також обмеженість ресурсів передачі, зокрема смуги пропускання та часу доступу до каналу. Це обмежує можливості застосування надлишкових методів підвищення завадостійкості та вимагає раціонального використання доступних параметрів передачі. За таких умов збереження цілісності даних набуває більшого значення, ніж максимізація пропускну здатності, оскільки навіть короточасні порушення передачі можуть призводити до втрати критично важливої інформації.

Таким чином, канал передачі даних безпроводної системи передачі інформації у даній роботі розглядається як нестационарний об'єкт комп'ютерного моделювання, для якого характерними є змінність параметрів у часі, вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів та переривчастий характер помилок передачі. Зазначені особливості обґрунтовують необхідність побудови адекватної імітаційної моделі каналу, що дозволяє досліджувати інформаційні процеси в умовах динамічної зміни середовища та слугує основою для подальшого аналізу методів забезпечення цілісності даних.

2.2 Модель навмисних завад у каналі передачі інформації

У межах дослідження інформаційних процесів у безпроводних системах передачі даних важливим є врахування навмисних дестабілізуючих впливів, які цілеспрямовано порушують нормальне функціонування каналу передачі даних [61]. На відміну від випадкових завад, що мають стохастичний характер і, як правило, описуються статистичними моделями шуму, навмисні завади формуються з урахуванням параметрів сигналу та особливостей каналу і спрямовані на максимальне погіршення якості передачі інформації.

У даній роботі навмисні завади розглядаються як окремий інформаційний вплив на канал передачі даних, що реалізується через внесення додаткових сигналів у радіочастотне середовище та призводить до зміни параметрів прийнятого сигналу. З позицій комп'ютерного моделювання такий вплив доцільно формалізувати у вигляді моделі завад, інтегрованої в імітаційну модель каналу передачі даних, яка дозволяє відтворювати різні сценарії дестабілізації процесів передачі даних.

Ключовою особливістю навмисних завад є їх адаптивний характер. Завади можуть змінювати свої параметри у часі залежно від стану каналу, спектральних характеристик сигналу та результатів моніторингу радіочастотного середовища. Унаслідок цього вплив завад не є сталим, а проявляється у вигляді часово змінних інтервалів погіршення співвідношення сигнал/шум, що призводить до нерівномірного розподілу помилок передачі та формування переривчастих ділянок порушення цілісності даних.

Для побудови моделі навмисних завад у роботі використовується абстрагований підхід, за якого завада не пов'язується з конкретною апаратною реалізацією, а описується через сукупність параметрів, що визначають її вплив на канал передачі даних. До таких параметрів належать часові характеристики завади, її спектральна локалізація, інтенсивність впливу та тривалість активних інтервалів. Це дозволяє розглядати навмисну заваду як узагальнений дестабілізуючий фактор, придатний для використання в різних сценаріях комп'ютерного моделювання.

У межах імітаційної моделі навмисні завади впливають на канал передачі даних шляхом зміни ефективних параметрів передачі, зокрема шляхом зниження співвідношення сигнал/шум та збільшення ймовірності виникнення бітових помилок. Такий підхід дозволяє без деталізації фізичних механізмів формування завад відтворювати їхній вплив на рівні інформаційних процесів, що є доцільним для дослідження цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації.

Запропонована модель навмисних завад забезпечує можливість формування різних сценаріїв дестабілізуючого впливу, зокрема зі змінною

інтенсивністю та часовою структурою завад. Це створює основу для подальшого врахування параметрів навмисного впливу при побудові узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних та для дослідження алгоритмічних методів забезпечення цілісності даних у нестационарних умовах функціонування безпроводних систем.

2.2.1 Особливості протидії БпЛА засобами РЕБ

Застосування засобів радіоелектронної боротьби у протидії безпілотним літальним апаратам розглядається як один із найбільш ефективних і ресурсно доцільних підходів. На відміну від кінетичних методів ураження, зокрема із застосуванням зенітно-ракетних комплексів протиповітряної оборони, що супроводжуються значними витратами боєприпасів як обмеженого та невідновного ресурсу, засоби РЕБ забезпечують можливість тривалого впливу на об'єкт за умови наявності стабільного енергоживлення [44]. Така особливість визначає їхню перевагу в контексті тривалих або масованих атак із використанням БпЛА.

Функціональне призначення засобів РЕБ у цьому випадку полягає не у фізичному знищенні апарата, а у порушенні нормального функціонування його інформаційно-керуючих систем. Це досягається шляхом впливу на радіоканали, що забезпечують керування польотом і передачу даних, а також на навігаційні підсистеми [24]. Зокрема, одним із базових напрямів є дестабілізація радіоканалу керування та телеметрії, що може реалізовуватися як у формі створення завад, так і через нав'язування некоректних режимів роботи, які призводять до втрати стійкого зв'язку між оператором і БпЛА. У результаті цього порушується передавання команд керування, знижується достовірність отримання телеметричної інформації, а в окремих випадках може відбуватися повна втрата контролю над апаратом.

Іншим важливим напрямом є вплив на навігаційний контур БпЛА, який зазвичай базується на використанні сигналів супутникових радіонавігаційних систем. У цьому випадку застосовуються методи придушення або спотворення навігаційних сигналів, що призводить до формування хибних координатних

даних або до повної втрати навігаційного забезпечення. Як наслідок, безпілотний апарат може відхилитися від заданого маршруту, втрачати орієнтацію у просторі або переходити в аварійні режими функціонування.

Застосуванню засобів радіоелектронної боротьби передують етапи виявлення та первинного аналізу об'єкта впливу, який здійснюється засобами радіо- та радіотехнічної розвідки. На цьому етапі безпілотний літальний апарат розглядається як джерело радіовипромінювання, що генерує характерні сигнали в процесі функціонування своїх систем керування, передачі даних і навігації. У результаті радіомоніторингу здійснюється фіксація самого факту наявності радіообміну, а також визначення основних сигнально-частотних параметрів радіоканалу керування і сигналів супутникових радіонавігаційних систем, які використовуються апаратом у конкретній зоні.

Отримані в процесі розвідки характеристики сигналів підлягають подальшій обробці, що включає їх класифікацію, оцінювання стабільності у часі та визначення належності до певних типів радіоелектронних засобів. На основі цього формується узагальнене інформаційне подання про об'єкт, яке використовується для підготовки цілевказання. Сформовані сигнально-частотні параметри передаються до засобів радіоелектронної боротьби та слугують основою для вибору режимів і параметрів завадового впливу, що забезпечує підвищення його ефективності за рахунок узгодження із характеристиками конкретного радіоканалу.

Сучасні засоби РЕБ можуть формувати широку номенклатуру радіоелектронних завад (таблиця 2.1), адаптивно обираючи ті з них, які максимальною мірою ефективні щодо конкретних об'єктів придушення [36, 65].

За умови успішного розрізнення цілей, як окремих ДРВ, засоби РЕБ можуть бути вибірковими, пригнічуючи тільки ДРВ з певними параметрами, наприклад, пульт оператора (ПО) БПЛА, що формує РКК з певною структурою сигналів, або сигнали певної СРНС [2]. У окремих випадках, за умови успішного розкриття структури сигналів і формату передаваних повідомлень в РКК і в

каналі навігації, засоби РЕБ дають змогу перехопити керування БпЛА і нав'язати йому хибну траєкторію польоту.

Таблиця 2.1 – Класифікація навмисних радіоелектронних завад

Класифікаційна ознака	Вид завади	Характеристика завад
За способом формування (реалізації)	Активні	Завади, що створюються енергією джерел завад (генераторів або ретрансляторів).
	Пасивні	Завади, що створюються розсіюванням енергії електромагнітних хвиль об'єктами або середовищами.
За ефектом (характером) впливу на РЕЗ	Маскувальні	Завади, що затрудняють виявлення, розпізнавання та визначення параметрів корисних сигналів засобів радіозв'язку.
	Імітаційні (дезінформуючі)	Завади, що створюють невірну інформацію (сигнали) в засобах радіозв'язку.
За співвідношенням спектра завад і корисних сигналів	Прицільні	Завади, що випромінюються на робочій частоті засобів радіозв'язку, що подавлюється.
	Загороджувальні	Завади з шириною спектра, що перевищує смугу частот сигналу засобів радіозв'язку.
	Прицільно-загороджувальні	Завади (скануючі, ковзні) зі змінною частотою випромінювання в діапазоні роботи радіозакладних пристроїв.
За структурою випромінювання	Неперервні	Завади, модульовані за амплітудою, частотою (фазою) або шумовою напругою.
	Імпульсні	Завади у вигляді серій не модульованих або модульованих радіоімпульсів.
За інтенсивністю	Слабкі	Завади, що не перевищують за рівнем корисний сигнал. Можуть визвати втрату до 25% переданої інформації, при цьому не знижують можливостей передачі перехопленої інформації.
	Середні	Завади, які за рівнем співрозмірні з сигналами засобів радіозв'язку. Викликають втрату не менше 50% інформації.
	Сильні	Завади, що значно перевищують корисний сигнал за рівнем. Призводять до втрати не менше 75% інформації і виключають можливість отримання корисної інформації.

Ефективність завадового впливу визначається енергетичними параметрами випромінювання та відстанню до об'єкта. З урахуванням закону оберненої пропорційності квадрату відстані потужність завадового сигналу на вході приймача БпЛА істотно зменшується зі зростанням дистанції. Це обмежує зону гарантованого впливу засобів РЕБ і зумовлює їх приналежність до систем ближньої дії. Додатковим фактором є вимоги електромагнітної сумісності з іншими радіоелектронними засобами, що обмежують допустимий рівень випромінюваної потужності в реальних умовах експлуатації.

Енергетично доцільнішим підходом у задачах радіоелектронного впливу вважається застосування прицільних завад, параметри яких узгоджуються з частотною структурою та сигнально-кодovими характеристиками конкретних радіоканалів керування або навігації. Така узгодженість забезпечує концентрацію енергії в обмеженій частотній області та, відповідно, підвищує ефективність придушення. Водночас реалізація цього підходу потребує попереднього визначення параметрів сигналів, що досягається або шляхом їх аналізу засобами радіотехнічної розвідки, або за рахунок використання накопичених баз даних. Це обмежує універсальність прицільних завад, оскільки їх результативність безпосередньо залежить від рівня апріорної обізнаності щодо характеристик конкретних систем.

Суттєвим фактором, що впливає на можливість ефективного радіоелектронного придушення, є режим функціонування безпілотного літального апарата. За наявності активного радіообміну або використання сигналів супутникових радіонавігаційних систем формується інформаційна основа для виявлення та подальшого впливу на відповідні канали. Натомість у випадку автономного польоту за заздалегідь заданою траєкторією із мінімізованим рівнем радіовипромінювання можливості радіотехнічної розвідки щодо виявлення апарата істотно знижуються. Це ускладнює процес ідентифікації сигнальних параметрів і, відповідно, формування ефективного цілевказання для засобів радіоелектронної боротьби.

Іншим підходом є використання загороджувальних завад, які формуються в широкому частотному діапазоні з метою одночасного впливу на декілька каналів зв'язку та навігації. Однак через розподіл випромінюваної потужності на значну смугу частот щільність енергії в окремих піддіапазонах зменшується, що негативно впливає на ефективність придушення конкретних сигналів. Додаткові труднощі виникають у випадку застосування БПЛА широкосмугових технологій або режимів із псевдовипадковою перебудовою частоти, коли енергетика корисного сигналу розподіляється у часі та частоті, а його параметри є динамічними. За таких умов ефективність загороджувальних завад істотно

знижується, що обмежує їх практичне застосування у протидії сучасним безпілотним системам.

Таким чином, результативність застосування засобів радіоелектронної боротьби у задачах протидії безпілотним літальним апаратам формується під впливом сукупності взаємопов'язаних чинників, серед яких визначальну роль відіграють енергетичні параметри впливу, частотні характеристики сигналів, часові особливості функціонування каналів зв'язку, а також алгоритмічні механізми оброблення та передачі інформації. Взаємодія цих складових визначає як можливість виявлення об'єкта, так і ефективність подальшого завадового впливу.

2.2.2 Тактико-технічні характеристики типових комплексів РЕБ

Активне поширення безпілотних літальних апаратів як у військовій, так і в цивільній сферах зумовило суттєве зростання рівня пов'язаних із ними загроз, що, у свою чергу, стимулювало інтенсивний розвиток ринку засобів протидії. У результаті спостерігається значне розширення номенклатури рішень, які пропонуються виробниками відповідного обладнання. Проведений аналіз відомостей, представлених у відкритих джерелах, а також на офіційних ресурсах компаній-розробників [28; 52; 53; 64; 68; 81; 87], свідчить про наявність на сучасному етапі широкого спектра засобів радіоелектронної боротьби, спеціально адаптованих для виявлення, придушення та нейтралізації безпілотних систем. До таких засобів можна віднести комплекси РЕБ: «Арбалетто-1», Р-330Ж «Житель», «Шипшина-АЕРО», «Репеллент-1», «Серп», «Атака-DBS», та антидронові рушніці: «KVSG-6», «EDM4S», «REX 1», «Пицаль-ПРО», «Таран-ПРО», «Stupor» тощо.

Усі наявні засоби радіоелектронної боротьби, призначені для протидії безпілотним літальним апаратам, доцільно класифікувати за функціональними можливостями, енергетичним потенціалом та умовами застосування. З урахуванням зазначених критеріїв виділяються три принципово відмінні групи.

До першої групи належать спеціалізовані бойові комплекси РЕБ, які характеризуються значною потужністю випромінювання та великою дальністю

впливу. Такі системи орієнтовані на виконання завдань як у мирний, так і у воєнний періоди, забезпечуючи ефективну протидію безпілотним апаратам різного призначення, включаючи військові. Представниками цієї категорії є комплекси типу Р-330Ж «Житель», «Репелент-1», «Красуха-4», «Шипшина-АЕРО».

Другу групу формують комплекси комерційного призначення, для яких характерний помірний рівень енергетичних параметрів і середня зона покриття. Основною сферою їх використання є захист периметрів об'єктів критичної інфраструктури від малорозмірних безпілотних платформ, зокрема мультикоптерів, переважно в умовах мирного часу. Водночас, у ситуаціях дефіциту спеціалізованих бойових систем, подібні засоби можуть додатково залучатися до виконання завдань у зоні бойових дій, зокрема за рахунок постачання волонтерськими структурами. До цієї категорії відносять системи «Серп», «Атака-DBS», «Арбалетто-1» та інші.

Третю групу становлять малогабаритні переносні засоби радіоелектронного впливу, що відзначаються низьким рівнем випромінюваної потужності та обмеженою дальністю дії. Вони призначені для індивідуального використання та дозволяють здійснювати вплив на один або декілька безпілотних апаратів у межах локальної зони. Конструктивно такі пристрої реалізовані у вигляді портативних засобів, що нагадують ручну зброю, і можуть ефективно застосовуватися безпосередньо оператором. До прикладів належать комплекси «KVSG-6», «EDM4S», «REX 1», «Піщаль-ПРО», «Таран-ПРО», «Stupor».

Такий підхід до класифікації дозволяє системно врахувати відмінності у технічних характеристиках і сценаріях застосування засобів РЕБ, що є важливим для подальшого аналізу їх ефективності у задачах протидії БпЛА.

Розглянемо технічні можливості та особливості застосування цих засобів РЕБ більш детально.

Бойові комплекси РЕБ. На основі аналізу тактико-технічних характеристик розглянутих бойових комплексів радіоелектронної боротьби

доцільно узагальнити їх функціональні можливості та ключові особливості. Типовий комплекс РЕБ загального призначення реалізує сукупність взаємопов'язаних функцій, спрямованих на забезпечення контролю та впливу на радіоелектронне середовище в межах визначеної зони відповідальності.

Зокрема, одним із базових напрямів його функціонування є здійснення радіо- та радіотехнічної розвідки, що включає збір і оброблення інформації про параметри сигналів, а також формування актуальної картини радіоелектронної обстановки. Важливою складовою є визначення характеристик і просторового положення джерел радіовипромінювання, що забезпечує можливість формування цілевказання та подальшої оцінки результативності впливу. Окрім цього, комплекс виконує функції радіоелектронного придушення, спрямовані на дестабілізацію або повне порушення функціонування систем зв'язку та радіолокації противника шляхом створення завад у відповідних діапазонах частот.

Сучасні комплекси радіоелектронної боротьби, як правило, мають дворівневу архітектуру та включають повітряну і наземну підсистеми, функціонування яких є взаємопов'язаним і координованим. Повітряна складова призначена для виконання завдань радіо- та радіотехнічної розвідки, зокрема виявлення, ідентифікації та визначення координат джерел радіовипромінювання, а також для здійснення активного радіоелектронного впливу на цільові об'єкти. Завдяки використанню мобільних носіїв така підсистема забезпечує розширення зони контролю та можливість впливу на об'єкти, розташовані на значній відстані від наземних елементів комплексу, яка зазвичай становить десятки кілометрів [7]. Як платформи для розміщення відповідного обладнання використовуються гелікоптери та тактичні безпілотні літальні апарати.

Наземна підсистема, що реалізується у вигляді територіально розподіленої сукупності засобів РЕБ, виконує функції моніторингу радіоелектронної обстановки та постановки завад каналам радіозв'язку. Основний акцент при цьому робиться на впливі у відповідних діапазонах частот, зокрема в

ультракороткохвильовому діапазоні. Ефективність функціонування комплексу досягається за рахунок узгодженої роботи наземних і повітряних засобів, що забезпечує синхронізацію процесів розвідки, аналізу та активного радіоелектронного впливу в межах єдиної системи.

Узагальнені ТТХ засобів РРТР повітряної підсистеми комплексу РЕБ загального призначення, що стосуються цієї роботи [64]:

- діапазон частот, у якому ведеться розвідка: 1,5-3000 МГц;
- діапазон частот, у якому ведеться придушення: 20-450 МГц;
- потужність випромінювання завад: 40-150 Вт;
- ширина миттєво пригнічуваної смуги частот: 10-25 кГц.

Типові тактико-технічні характеристики засобів радіо- та радіотехнічної розвідки (РРТР) наземної підсистеми комплексу радіоелектронної боротьби загального призначення, наведені в сучасних аналітичних оглядах відкритих джерел [64; 79], дозволяють оцінити потенціал таких систем щодо виявлення та придушення каналів керування БпЛА.

Згідно з даними [64; 79], для сучасних мобільних комплексів РЕБ характерні такі параметри:

- діапазон частот ведення радіорозвідки: 20–15000 МГц;
- миттєва смуга огляду: близько 2,5 ГГц;
- роздільна здатність за частотою: не гірше 1 кГц;
- швидкість пошуку в діапазоні розвідки: до 3000 ГГц/с;
- імовірність розпізнавання типу сигналу та РЕЗ за 0,2 с: не менше 0,8;
- діапазон частот придушення: 1,5–2500 МГц (у перспективних зразках – до 6 ГГц);
- потужність випромінювання завад: 0,5–1 кВт;
- кількість одночасно пригнічуваних цілей: від 5 до 300;
- ширина спектра завад: для прицільних – 3–50 кГц, для загороджувальних – 150–3000 кГц;
- час реакції на постановку завад: близько 0,8 с при невідомій частоті та до 0,04 с при відомій частоті;

- можливість виявлення та придушення сигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти (ППРЧ) до 1000 стрибків/с;
- дальність ефективного придушення: до 100 км.

Наведені характеристики свідчать, що сучасні комплекси РЕБ здатні здійснювати широкосмугову радіорозвідку з високою швидкістю перебору частот та мінімальним часом реагування, що створює реальну загрозу для статичних радіоканалів керування БпЛА. Особливо критичним є інтервал реакції 0,04 с при відомій частоті, який визначає граничні часові вимоги до алгоритмів адаптивного керування параметрами радіоканалу.

Останніми роками на озброєння провідних армій активно надходять спеціалізовані бойові комплекси радіоелектронної боротьби, призначені для протидії безпілотним літальним апаратам різних класів. Їхні узагальнені характеристики можна представити таким чином.

1. Параметри радіо- та радіотехнічної розвідки (РПТР):
 - робочий діапазон розвідки: 200–6000 МГц;
 - ймовірність пеленгування сигналів із режимом ППРЧ (≥ 1000 стрибків/с): не менше 0,85.
2. Діапазон і об'єкти придушення:
 - робочий діапазон придушення: 200–6000 МГц;
 - канали неліцензованого та професійного радіозв'язку (20–80; 135–174; 220–400; 400–470 МГц);
 - діапазони комерційних систем зв'язку (GSM, 3G, 4G, CDMA, Wi-Fi).
3. Дальність придушення:
 - засобів зв'язку на борту БпЛА: до 30–50 км;
 - засобів зв'язку на пункті керування: до 10–25 км;
 - навігаційних каналів СРНС на БпЛА: до 30–50 км.
4. Потужність впливу:
 - канал «ПО – БпЛА» та телеметрія: 500–1000 Вт;
 - канал «БпЛА – ПО»: 300–500 Вт;
 - канал СРНС: 300–1000 Вт.

5. Типи формованих завад:

- для каналів навігації: структурно-прицільні імітаційні впливи та шумові прицільні завади;
- для каналів зв'язку: прицільні, ковзні та загороджувальні завади.

Комерційні комплекси РЕБ. Комерційні засоби радіоелектронної протидії формувалися насамперед як інструменти забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та обмежених територій у мирний період експлуатації. Їх проектування здійснюється з обов'язковим урахуванням вимог електромагнітної сумісності, що забезпечує коректне функціонування наявних систем зв'язку та навігації в зоні розгортання. На відміну від спеціалізованих військових комплексів, такі рішення орієнтовані на контрольований і локалізований вплив, що визначає їх конструктивні та функціональні особливості.

Однією з ключових характеристик комерційних систем є відносно невисокий енергетичний потенціал випромінювання, що обмежує дальність їх ефективного застосування, але водночас дозволяє чітко окреслювати зону дії та зменшувати небажані електромагнітні впливи за її межами. Для забезпечення просторової селективності широко використовуються спрямовані антенні системи, які дають змогу формувати керовані сектори пригнічення та реалізовувати модульний принцип побудови захисного периметра.

Функціонально такі комплекси інтегрують засоби радіо- та радіотехнічної розвідки з додатковими методами виявлення, зокрема пасивними радіолокаційними технологіями, що використовують сторонні джерела випромінювання. Це забезпечує можливість детектування безпілотних літальних апаратів навіть за умов обмеженого або відсутнього власного радіовипромінювання. Подальший вплив на виявлені об'єкти реалізується переважно через прицільні за частотою та сигнальною структурою завади, орієнтовані на типові телекомунікаційні стандарти, які використовуються малими комерційними БпЛА.

Важливою складовою є застосування алгоритмів автоматизованого розпізнавання протоколів керування, що дозволяє адаптувати параметри впливу до конкретних типів сигналів і, за наявності відповідних вразливостей, підвищувати ефективність протидії. Крім того, для впливу на навігаційні підсистеми використовуються комбіновані підходи, які поєднують частотно-спрямоване шумове придушення захищених сигналів супутникових радіонавігаційних систем із імітаційними методами впливу на відкриті сигнали, зокрема в діапазоні L1. Така комбінація дозволяє реалізувати як дестабілізацію навігаційного забезпечення, так і нав'язування некоректних координатних даних залежно від типу сигналу.

Таким чином, комерційні комплекси РЕБ реалізують більш селективні та протокол-орієнтовані механізми протидії, що наближає їх до інформаційно-структурного рівня впливу. Водночас така спеціалізація знижує їх універсальність, оскільки ефективність значною мірою залежить від використання БпЛА стандартних комунікаційних технологій (2G/3G/4G, Wi-Fi) та типових навігаційних сервісів СРНС.

Малогабаритні носимі засоби РЕБ. Із середини 2010-х років, у зв'язку зі зростанням ролі безпілотних літальних апаратів у цивільній та військовій сферах, набули поширення малогабаритні носимі засоби радіоелектронної протидії, відомі як «антидронові рушниці» (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Носимий засіб РЕБ «DroneDefender»

Їх поява зумовлена потребою у мобільних та оперативних рішеннях для локального впливу на канали керування та навігації малих БпЛА. Порівняно з повнофункціональними стаціонарними та мобільними комплексами радіоелектронної боротьби, портативні засоби цього класу характеризуються спрощеною функціональною архітектурою та обмеженими можливостями впливу. Насамперед це проявляється у відсутності вбудованих засобів радіотехнічної розвідки, що унеможливує повноцінний аналіз сигнально-частотних параметрів каналів зв'язку безпілотних літальних апаратів і, відповідно, не дозволяє реалізовувати адаптивні сценарії протидії. У більшості випадків такі пристрої орієнтовані на генерацію шумових завад у типових діапазонах, які використовуються системами супутникової навігації та каналами керування малих БпЛА, без урахування індивідуальних характеристик сигналів.

Обмеження енергетичного потенціалу випромінювання безпосередньо впливає на радіус ефективного застосування, який, як правило, є відносно невеликим і визначається як технічними параметрами передавача, так і умовами поширення радіохвиль. Просторова селективність впливу досягається за рахунок використання спрямованих антен, орієнтація яких здійснюється оператором у ручному режимі, що накладає додаткові вимоги до точності наведення. Живлення таких засобів реалізується від автономних джерел із обмеженою ємністю, що обумовлює їх призначення для короткочасного або епізодичного використання, а також вводить обмеження на тривалість безперервної роботи, зокрема з урахуванням впливу електромагнітного випромінювання на оператора.

З огляду на зазначені особливості, носимі засоби радіоелектронної боротьби доцільно інтерпретувати як інструменти локального радіоелектронного впливу, орієнтовані на протидію типовим комерційним безпілотним платформам у межах обмежених дистанцій. Вони не передбачають реалізації складних процедур аналізу сигналів і адаптивного керування параметрами впливу, що визначає їх допоміжну роль у загальній системі протидії.

Підприємство «Антидрон Україна» розробило портативний пристрій C-Vog FPVKiller (рис. 2.2) для боротьби з ударними FPV-дронами російських військ. Прилад у вигляді прямокутного блоку з антеною призначений для нейтралізації небезпечних безпілотників типу FPV, які Росія масово застосовує в Україні. C-Vog FPVKiller приводиться в дію натисканням міцної «антивандальної» кнопки та створює завади, що пригнічують канал управління дронів, практично невразливих для інших засобів РЕБ [9].



Рисунок 2.2 – C-Vog FPVKiller

Технічні характеристики C-Vog FPVKiller:

придушення каналів управління – у межах 850-940 МГц;

система управління – механічний вимикач;

час роботи – до 1 години;

антена – колінеарна, склопластиковая;

час безперервної роботи – до 3-4 хвилин, потім потрібне охолодження;

час заряджання батареї – 2,5-3 години.

Підприємство «Антидрон Україна» також анонсувало випуск експериментальної рушниці (рис. 2.3), яка здатна придушувати російські БпЛА «Ланцет». За словами розробників, потужний засіб радіоелектронної боротьби

слід застосовувати в парі з оператором, оснащеним аналізатором і направленою антеною, який моніторитиме ефір на наявність характерних «ріжків» радіочастот і визначатиме напрямок польоту «Ланцета». Після цього військовий може застосувати антидронову рушницю і придушити канали управління БПЛА, щоб останній впав на землю або повернувся до місця запуску. Поки що розробники вказують тільки на деякі технічні особливості розробки [21]:

потужність – 50 Вт;

тип антени – спрямована 8 дБ;

автономність – 2 години роботи від батареї.



Рисунок 2.3 – Антидрон C-Vog Max

Підприємство «Антидрон Україна» також представило так званий «окопний» РЕБ-засіб «Периметр» (рис. 2.4) купольної/спрямованої протидії ворожим БЛА.

Діапазони:

- 850-940 МГц (50 Вт);
- 1170-1280 МГц (30 Вт);
- 1540-1620 МГц (30 Вт);
- 2190-2360 МГц (50 Вт);
- 2400-2485 МГц (30 Вт);
- 5725-5850 МГц (30 Вт).



Рисунок 2.4 – «Окопний» РЕБ-засіб «Периметр»

Аналіз відмінних рис носимих засобів РЕБ та їхніх ТТХ, дає змогу дійти висновку, що ці засоби є найменш «інтелектуальними» і найменш ефективними під час виконання завдання протидії малим БпЛА. З одного боку, простота й мобільність цих засобів дає змогу їх застосовувати без спеціально навченого персоналу, а з іншого – ці засоби можна застосовувати лише епізодично й стосовно найпростіших малих БпЛА-мультикоптерів. Відсутність у функціоналі цих виробів режимів формування імітуючих завад для каналу навігації призводить до того, що поведінка БпЛА в умовах «жорсткого» шумового придушення каналів управління й навігації стає фактично непередбачуваною. Незважаючи на те, що виробники подібних засобів декларують такі ефекти як «падіння БпЛА» або «приземлення БпЛА», фактична поведінка БпЛА визначатиметься винятково програмою їхніх дій у разі втрати зв'язку й може суттєво відрізнятися від вищевказаних ефектів, аж до продовження польоту згідно із завчасно заданою бойовою програмою.

2.2.3 Пригнічення навігаційної системи БпЛА

Навігаційна система БпЛА розглядається як окремий інформаційний канал із багатоджерельною структурою даних. Ефективність її радіоелектронного придушення визначається рівнем інтеграції навігаційних сенсорів.

У простих малих БпЛА використовується переважно апаратура споживача СРНС. У більш складних системах застосовується інтеграція СРНС з інерціальними навігаційними системами, висотомірами та іншими сенсорами [5; 41]. У середніх і важких БпЛА супутниковий канал є допоміжним і використовується для корекції ІНС, що знижує вразливість до придушення.

Радіоелектронний вплив у навігаційному каналі спрямований переважно на сигнали СРНС у діапазоні 1,1–1,6 ГГц. Застосовуються шумові, гармонійні та імітаційні завади. Найбільш небезпечними є імітаційні (спуфінг), які відтворюють структуру супутникових сигналів із контрольованими частотними, фазовими та часовими параметрами з метою нав'язування хибного місцезнаходження.

Однак реалізація імітаційних завад потребує попередньої розвідки параметрів сигналів та є ефективною переважно проти малих БпЛА з простими навігаційними системами. У випадку інтегрованих систем порушення супутникового каналу виявляється шляхом порівняння з іншими джерелами навігаційних даних, що обмежує результативність РЕБ.

Отже, придушення навігації є критичним переважно для малих БпЛА, тоді як для середніх і важких платформ воно не гарантує втрати функціональності, що необхідно враховувати при побудові імітаційної моделі завадового впливу.

2.2.4 Пригнічення радіоканалів керування та передачі даних БпЛА

Підсистема керування та радіозв'язку БпЛА є багатоканальною інформаційною структурою, що включає декілька радіоліній з різними функціональними призначеннями. Передавані цими каналами дані відрізняються за типом (керуючі команди, телеметрія, корисне навантаження), обсягом, вимогами до затримки, рівнем критичності та криптографічного захисту інформації.

З позицій теорії інформаційних процесів задача радіоелектронного придушення каналів «ПО – БпЛА» та «БпЛА – ПО» зводиться до створення таких умов на вході приймача, за яких значення відношення сигнал/шум стає недостатнім для забезпечення заданого рівня достовірності приймання даних. У термінах цифрових систем зв'язку це означає перевищення допустимого рівня бітової або кадрової помилки (BER , PER), що призводить до втрати цілісності інформації.

Характерною особливістю радіоелектронного впливу на канали зв'язку безпілотних літальних апаратів є необхідність комплексного врахування параметрів, що визначають їхню завадостійкість і функціональну ефективність. Передусім це стосується сигнально-кодових характеристик, зокрема типів модуляції, застосованих методів завадостійкого кодування, а також використання широкосмугових технологій або режимів із псевдовипадковою перебудовою робочої частоти. Такі особливості безпосередньо впливають на стійкість каналу до зовнішніх дестабілізуючих впливів і визначають вимоги до параметрів завад.

Не менш важливим є врахування структури передаваних даних і їх функціональної ролі в системі. Керуючі команди, які забезпечують безпосереднє управління польотом, потребують значно вищого рівня достовірності приймання порівняно з телеметричною інформацією або потоками даних від корисного навантаження, що зумовлює різні критерії оцінювання ефективності придушення для різних типів інформації.

Суттєвий вплив на результативність радіоелектронного впливу мають енергетичні та просторові характеристики каналу, включаючи потужність передавальних пристроїв, параметри антенних систем і втрати сигналу на трасі поширення. Додатково необхідно враховувати часові аспекти функціонування каналу, такі як затримки передавання, режими повторної передачі та алгоритми забезпечення надійності зв'язку, які можуть компенсувати вплив завад.

Узагальнюючи зазначене, радіоелектронне придушення каналів зв'язку безпілотних літальних апаратів доцільно розглядати як зовнішній

дестабілізуючий вплив на параметри каналу передачі даних. Такий вплив змінює статистичні характеристики процесу передавання інформації, зокрема показники завадостійкості, і призводить до порушення умов гарантованої доставки даних із заданими показниками якості.

Інформаційна взаємодія між пультом оператора та безпілотним літальним апаратом організовується у вигляді двонаправленого радіообміну, який включає канали з різним функціональним призначенням. Один із напрямків забезпечує передавання керуючої інформації від оператора до апарата і використовується для формування команд польоту, керування бортовими підсистемами та засобами корисного навантаження. Цей канал є критичним для підтримання керованості БпЛА, оскільки забезпечує безпосередній вплив на його поведінку в реальному часі.

У зворотному напрямку здійснюється передавання інформації від безпілотного апарата до пульта оператора. Такий канал включає телеметричні дані, що відображають поточний стан бортових систем, службову інформацію, а також підтвердження виконання команд керування. Окрім цього, у його складі може функціонувати високошвидкісна лінія передавання даних від корисного навантаження, яка забезпечує доставку відеоінформації або даних від сенсорних систем у режимі реального часу.

Залежно від характеру передаваних даних та їхньої значущості для функціонування системи зазначені канали можуть реалізовуватися в різних частотних діапазонах і використовувати різні сигнально-кодові рішення. Це зумовлює різний рівень вимог до достовірності приймання та визначає індивідуальну стійкість кожного каналу до впливу завад, що необхідно враховувати при аналізі та моделюванні процесів радіообміну.

Ключовим елементом, що визначає працездатність системи керування безпілотним літальним апаратом, є радіоканал керування у напрямку передавання команд від пульта оператора до БпЛА. Саме через цей канал реалізується зовнішнє управління польотом, тому його порушення або

деградація безпосередньо призводять до втрати керованості апарата і мають найбільш виражений дестабілізуючий ефект для всієї системи.

Разом із тим ефективне придушення зазначеного каналу супроводжується низкою об'єктивних ускладнень, пов'язаних як із фізичними особливостями поширення сигналів, так і з архітектурними рішеннями сучасних систем зв'язку. Зокрема, суттєву роль відіграє просторово-енергетична рознесеність пульта оператора та засобів радіоелектронної боротьби, а також використання вузькоспрямованих антен у висхідному каналі, що ускладнює процес виявлення та аналізу його параметрів. Додатковим фактором є наявність частотно-часової асиметрії між каналами передавання інформації у напрямках «вгору» та «вниз», що характерно для спеціалізованих безпілотних систем і унеможливлює пряме використання параметрів одного каналу для впливу на інший.

Крім того, сучасні виробники активно впроваджують комплексні механізми підвищення завадостійкості, які включають застосування широкосмугових сигналів, використання режимів псевдовипадкової перебудови робочої частоти, резервування каналів зв'язку, криптографічний захист переданої інформації та дублювання критично важливих повідомлень. Сукупність зазначених факторів істотно підвищує стійкість радіоканалу керування до зовнішніх дестабілізуючих впливів і, відповідно, ускладнює реалізацію ефективного радіоелектронного придушення.

Водночас суттєвим обмеженням засобів протидії, що ґрунтуються виключно на застосуванні радіоелектронного впливу, є неможливість забезпечення передбачуваної реакції безпілотного літального апарата на втрату зовнішнього керування. У разі пригнічення радіоканалу керування система може перейти в автономний режим функціонування, логіка якого визначається заздалегідь закладеними алгоритмами. Такий режим може передбачати різні сценарії поведінки, зокрема автоматичне повернення до точки старту або продовження виконання поставленого завдання із використанням внутрішніх навігаційних засобів.

Лінія передавання інформації у напрямку «БпЛА – ПО» посідає друге місце за критичністю після РКК, оскільки забезпечує доставлення телеметричних даних і інформації від корисного навантаження. Особливе значення в її структурі має відеоканал, який використовується для реалізації режимів ручного або напівавтоматичного керування на основі візуальної інформації в реальному масштабі часу.

Передавання відеоданих характеризується підвищеними вимогами до пропускної здатності каналу та мінімізації затримок, що у практичних реалізаціях часто обмежує застосування складних криптографічних механізмів захисту інформації. Додатковим чинником, який впливає на вразливість цієї лінії, є конструктивні обмеження безпілотних платформ, зокрема масо-габаритні характеристики, що зумовлюють використання антен із широкою або близькою до всеспрямованої діаграмою спрямованості. Це, у свою чергу, підвищує ймовірність як несанкціонованого перехоплення сигналу, так і ефективного радіоелектронного впливу на канал.

У випадку придушення зазначеної лінії оператор позбавляється візуального зворотного зв'язку з апаратом і змушений здійснювати керування, спираючись виключно на телеметричні повідомлення. Така ситуація суттєво знижує точність і оперативність прийняття рішень, що безпосередньо впливає на якість керування польотом.

Водночас результативність радіоелектронного впливу на відеоканал істотно обмежується просторовими умовами функціонування системи. Для забезпечення необхідного рівня завадового сигналу критичною є як енергетична, так і геометрична доступність приймального тракту. Через значну висоту польоту безпілотного апарата дальність прямої радіовидимості між ним і пультом оператора або ретрансляційним вузлом може перевищувати межі ефективного впливу наземних засобів радіоелектронної боротьби. За таких умов навіть повна поінформованість про частотні та сигнальні параметри каналу не гарантує його надійного придушення, що визначає об'єктивні обмеження ефективності наземних систем РЕБ.

Для дестабілізації функціонування радіоліній керування та передавання даних безпілотних літальних апаратів застосовується широкий спектр радіоелектронних завад (таблиця 2.1), які доцільно систематизувати за рівнем обізнаності про параметри цільового каналу зв'язку. Такий підхід дозволяє відобразити залежність ефективності впливу від доступності інформації про частотні, сигнальні та структурні характеристики радіолінії.

У випадках, коли відсутня достовірна інформація про робочі частоти або має місце масове застосування БпЛА, використовуються широкосмугові завадові впливи. Їх основне призначення полягає у перекритті максимально можливого частотного діапазону, в якому потенційно можуть функціонувати канали зв'язку. До цього типу належать завади, сформовані у вигляді широкосмугового шумового сигналу з високим рівнем енергетичної потужності, що охоплює весь робочий спектр, а також вузькосмугові завади зі змінною частотою, які реалізують ковзне сканування діапазону. Хоча такі впливи забезпечують універсальність застосування, їх ефективність обмежується розподілом енергії по широкій смузі частот.

За наявності результатів радіотехнічної розвідки, що дозволяють визначити частотні параметри конкретної радіолінії, доцільним є застосування частотно-прицільних завад. Вони орієнтовані на вибірковий вплив на окремі канали або групи апаратів із однаковими характеристиками зв'язку. У межах цього підходу використовуються як шумові, так і гармонійні сигнали, налаштовані на відповідну частоту, а також вузькосмугові завади з динамічною перебудовою частоти у випадку використання широкосмугових сигналів або технологій псевдовипадкової перебудови робочої частоти. Більш складним рівнем впливу є імітаційні завади, які враховують не лише частотні, а й структурні особливості сигналу, включаючи формат передаваних даних. У цьому випадку можливе відтворення як сигнальних, так і інформаційних параметрів радіолінії, що відкриває можливості для нав'язування хибних режимів функціонування системи керування.

З точки зору теорії інформаційних систем еволюція засобів радіоелектронного впливу від шумових до імітаційних завад відображає поступове зростання рівня інформаційної обізнаності щодо параметрів каналу зв'язку, включаючи використовувані протоколи, структуру сигналів та формат передаваних даних. Чим повнішою є ця інформація, тим більш цілеспрямованим і ефективним може бути вплив на функціонування радіолінії.

Додаткове підвищення результативності придушення досягається за рахунок просторової селекції завадових сигналів. У разі, якщо засобами моніторингу визначено траєкторію руху безпілотного апарата або локалізовано положення пульта оператора, стає можливим формування спрямованого радіоелектронного впливу з урахуванням орієнтації діаграм спрямованості антен. Такий підхід дозволяє більш ефективно концентрувати енергетичний ресурс у потрібному напрямку та зменшувати небажаний вплив на сторонні радіоелектронні системи.

На сучасному етапі розвитку радіоелектронної боротьби найбільш поширеними залишаються частотно-прицільні шумові завади, які застосовуються для впливу на канали зв'язку між БпЛА та пультом оператора. Водночас перспективним напрямом є використання структурно-імітаційних завад, здатних відтворювати внутрішню організацію сигналу та логіку передавання даних. Однак реалізація таких методів потребує значно складніших алгоритмів оброблення сигналів, аналізу протоколів та синтезу впливів, що обмежує їх застосування переважно сучасними або спеціалізованими засобами радіоелектронної боротьби нового покоління.

У процесі організації радіоелектронного впливу на канали керування та передавання даних безпілотних літальних апаратів сучасні засоби РЕБ функціонують відповідно до багаторівневої адаптивної стратегії, структура якої визначається ступенем розкриття параметрів радіоліній. Така стратегія передбачає послідовне ускладнення характеру впливу – від універсальних широкосмугових завад до високоспеціалізованих інформаційно-орієнтованих дій.

На початковому рівні реалізується етап частотної ідентифікації, в межах якого засоби радіо- та радіотехнічної розвідки здійснюють виявлення активності БпЛА та визначення робочих частот висхідного і низхідного каналів зв'язку. У випадку недостатньої точності ідентифікації або за умов перевищення кількості цілей над можливостями селективного впливу система переходить до застосування широкосмугових або ковзних загороджувальних завад у межах імовірного діапазону функціонування радіоканалів.

Подальший розвиток впливу передбачає етап сигнально-структурного аналізу, коли за наявності інформації про частотні параметри здійснюється спроба визначення внутрішньої організації сигналу, його модуляційних характеристик і просторової конфігурації каналу. Якщо ці параметри залишаються невідомими або канал характеризується високим рівнем криптографічного захисту інформації, застосовуються частотно-орієнтовані шумові або гармонійні завади без урахування структури передавання даних.

За наявності технічної можливості врахування просторових характеристик системи реалізується етап просторової селекції, що передбачає формування спрямованого впливу з урахуванням геометрії розташування елементів системи. При цьому вплив на висхідний канал здійснюється із супроводом безпілотного апарата, тоді як придушення низхідного каналу орієнтується на пункт управління або ретрансляційні вузли.

Наступним рівнем є етап структурної імітації, який стає можливим за умови визначення типу сигналу та його структурних особливостей. У цьому випадку формуються імітаційні завади, що відтворюють сигнальні характеристики радіолінії, зокрема шляхом ретрансляції перехоплених фрагментів. Якщо ж канал використовує широкосмугові сигнали або режими псевдовипадкової перебудови частоти, застосовуються відповідні широкосмугові або ковзні завадові впливи в межах робочої смуги.

Найвищий рівень впливу досягається на етапі інформаційно-прицільного впливу, коли стають доступними формати передавання даних і протоколи керування. У такому випадку можливе формування складних імітаційних

сценаріїв, орієнтованих не лише на сигнальний, а й на інформаційний рівень взаємодії, включаючи підміну керуючих команд або ін'єкцію хибних даних у канал. Подібні підходи є характерними для систем, що використовують криптографічно вразливі протоколи. Як приклад можна розглядати перехоплення відеопотоку у низхідному каналі з подальшим відтворенням раніше записаних фрагментів, що створює для оператора ілюзію нормального функціонування безпілотної системи.

Орієнтовне оцінювання результативності придушення каналів керування та передачі даних може здійснюватися на основі двох відносно простих підходів, які дають змогу кількісно оцінити вплив завад на працездатність радіолінії.

Перший підхід ґрунтується на аналізі завадозахищеності каналу за показником бітової помилки. У цьому випадку для конкретної комбінації сигналу, модуляції та завадостійкого коду, що використовується в радіолінії, визначається значення ймовірності помилкового приймання біта за досягнутого на вході приймача відношення сигнал/шум. Отримане значення порівнюється з гранично допустимим рівнем бітової помилки, який вважається прийнятним для відповідного протоколу зв'язку. Такий підхід дозволяє оцінити, чи зберігає система здатність забезпечувати потрібний рівень достовірності передавання інформації в умовах завадового впливу.

Другий підхід базується на розрахунку енергетичного бюджету радіолінії. У межах цього підходу оцінюється сумарне співвідношення між потужністю корисного сигналу, втратами на трасі поширення, параметрами антенних систем і рівнем завадового впливу. Надалі розраховане значення порівнюється з пороговою чутливістю приймача. Якщо енергетичні умови на вході приймального тракту виявляються гіршими за допустимі, це свідчить про неможливість надійного приймання сигналу та, відповідно, про досягнення ефекту придушення.

Таким чином, перший підхід орієнтований переважно на оцінювання якості приймання з точки зору достовірності передавання даних, тоді як другий дозволяє аналізувати можливість функціонування радіолінії на енергетичному

рівні. Їх спільне використання забезпечує більш повне уявлення про ефективність радіоелектронного впливу на канали зв'язку безпілотного літального апарата.

2.3 Параметри навмисних завад та особливості їх впливу на канал

Для адекватного відтворення навмисних дестабілізуючих впливів у межах імітаційної моделі каналу передачі даних необхідним є формалізований опис параметрів завад, які визначають характер їх впливу на процеси передачі даних. На відміну від випадкових завад, параметри навмисного впливу не є сталими та можуть змінюватися у часі відповідно до умов функціонування каналу і сценарію дестабілізації, що зумовлює складний, нестационарний характер інформаційних процесів.

Однією з основних груп параметрів навмисних завад є часові характеристики, які визначають моменти появи завади, тривалість активних інтервалів та пауз між ними. Зміна часової структури завад призводить до нерівномірного погіршення умов передачі даних і формування переривчастих ділянок порушення цілісності інформації. У таких умовах канал передачі даних функціонує у режимі чергування інтервалів відносно стабільної передачі та інтервалів значного зростання ймовірності виникнення помилок.

Важливим параметром навмисного впливу є спектральна локалізація завади, яка визначає частотний діапазон, у межах якого відбувається погіршення якості прийому сигналу. Зміна спектральних характеристик завади безпосередньо впливає на ефективні параметри каналу, зокрема на співвідношення сигнал/шум у робочій смузі частот [95]. За наявності навмисних завад спостерігається різке зниження якості прийому в окремих частотних інтервалах, що ускладнює використання статичних моделей каналу та потребує врахування спектральної мінливості умов передачі.

Інтенсивність навмисної завади є ще одним суттєвим параметром, що визначає ступінь дестабілізації каналу передачі даних. Зі збільшенням інтенсивності впливу зростає рівень зашумлення прийнятого сигналу, що

призводить до зниження співвідношення сигнал/шум і, відповідно, до зростання ймовірності виникнення бітових помилок. При цьому характер помилок набуває кластерного вигляду, коли значна кількість помилкових бітів виникає протягом обмежених часових інтервалів, що є типовим для умов дії навмисних завад.

Сукупний вплив часових, спектральних та енергетичних параметрів навмисних завад зумовлює складну динаміку зміни характеристик каналу передачі даних. У таких умовах ефективні параметри передачі не можуть бути описані одним фіксованим набором значень, а повинні розглядатися як часові функції, що відображають поточний стан каналу. Це ускладнює використання миттєвих показників якості передачі та обґрунтовує необхідність застосування моделей, здатних враховувати накопичений вплив завад на інформаційні процеси.

Параметри навмисних завад визначають не лише рівень погіршення якості передачі даних, але й часову структуру порушень цілісності інформації в каналі. Формалізований опис цих параметрів у межах імітаційної моделі створює основу для подальшого врахування апаратних обмежень засобів передачі та побудови моделі помилок передачі даних у нестационарних умовах, що розглядається в наступних підпунктах розділу.

Формування алгоритму дій засобу пригнічення

Для побудови алгоритму дій засобу РЕБ противника (засобу пригнічення) та його подальшого використання в імітаційній моделі необхідно зафіксувати припущення щодо класу цілі – типового БпЛА, для якого аналіз буде репрезентативним (цільова система). У межах роботи розглядається клас малих професійних БпЛА-квадрокоптерів, що, як правило, використовують спрощену інтегровану навігаційну підсистему на основі поєднання даних апаратури споживача супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) та мікромеханічних інерціальних навігаційних систем (ІНС). Для середніх і важких БпЛА, оснащених більш складними інтегрованими навігаційними комплексами, вплив на супутниковий навігаційний канал часто не призводить до критичної

деградації навігаційної функції через наявність механізмів виявлення відхилень та корекції за альтернативними джерелами даних.

Раніше було обґрунтовано, що сценарії «інтелектуального» впливу на навігацію (зокрема, структурно-прицільні імітаційні завади з метою нав'язування хибного місцеположення) найбільш релевантні саме для простих навігаційних реалізацій, характерних для цільової системи. Водночас подальше поширення навігаційних підходів на основі електронних карт місцевості та методів технічного зору об'єктивно знижує результативність придушення/спуфінгу СРНС навіть для цього класу апаратів.

З огляду на це, у даній роботі основну увагу зосереджено не на навігаційному каналі, а на найбільш критичному для функціонування цільової системи елементі – безпроводному каналі керування. З позицій функціональної стійкості системи максимальний ефект досягається при деградації каналу керування у напрямку «вгору» (від пункту управління до цільової системи), оскільки саме він забезпечує доставку команд і визначає можливість зовнішнього управління цільовою системою.

У термінах моделювання задача пригнічення каналу керування формалізується як створення на вході приймача цільової системи таких умов, за яких відношення сигнал/шум (або еквівалентні метрики якості приймання) не дозволяє забезпечити заданий рівень достовірності приймання керуючої інформації. Це визначає вимоги до алгоритму РЕБ у моделі: виявлення активного каналу, оцінювання його параметрів та формування завадового впливу, достатнього для переведення каналу в стан втрати працездатності за критеріями цілісності даних у процесі передачі.

У межах формування імітаційної моделі приймемо припущення, що в цільовій системі безпроводний канал керування у напрямках «вгору» та «вниз» реалізується з різними частотно-часовими параметрами. За таких умов навіть успішне розкриття параметрів каналу «вниз» під час наближення цільової системи до засобів радіо- та радіотехнічної розвідки не забезпечує

автоматичного формування цілевказання для пригнічення каналу «вгору», оскільки частотні та часові характеристики цих ліній є незалежними.

Для аналізу найгіршого сценарію приймається припущення про застосування проти цільової системи бойового комплексу РЕБ. Вважається, що попри значну просторову віддаленість пункту управління від засобів РРТР, а також використання вузьконаправлених антен у каналі «вгору», параметри цього каналу були ідентифіковані з достатньою точністю, після чого засобам пригнічення сформовано цілевказання.

З метою параметризації алгоритму дій РЕБ в імітаційній комп'ютерній моделі використовуються такі ключові характеристики наземної підсистеми РРТР:

- діапазон радіорозвідки: 20–15000 МГц;
- миттєва смуга огляду: до 2,5 ГГц;
- ймовірність розпізнавання типу сигналу та РЕЗ за 0,2 с: не менше 0,8;
- діапазон частот придушення: 1,5–6000 МГц;
- кількість одночасно пригнічуваних цілей: 5–300;
- ширина спектра завад:
 - прицільних – 3–50 кГц;
 - загороджувальних – 150–3000 кГц;
- час реакції на постановку завад:
 - за невідомою частотою – до 0,8 с;
 - за відомими частотами – до 0,04 с;
- можливість виявлення та пригнічення сигналів з режимом ППРЧ до 1000 стрибків/с.

Зазначені параметри використовуються як вхідні обмеження та часові константи в алгоритмі моделювання завадового впливу.

У випадку застосування комерційних або малогабаритних носимих засобів РЕБ алгоритм впливу суттєво спрощується (відсутність повноцінної розвідки параметрів, обмежена смуга та потужність, переважання широкосмугових шумових завад). Проте включення таких сценаріїв до імітаційної моделі є

доцільним для порівняльного аналізу ефективності різних типів завадового впливу.

2.4 Врахування апаратних обмежень програмно-визначеного радіо при моделюванні каналу

При побудові імітаційної моделі каналу передачі даних безпроводної системи передачі інформації важливим є врахування апаратних обмежень засобів реалізації передачі і прийому сигналів, зокрема програмно-визначених радіопристроїв. На відміну від абстрактних теоретичних моделей каналу, орієнтованих на ідеалізовані умови функціонування, використання програмно-визначеного радіо накладає додаткові обмеження на часові, частотні та функціональні параметри інформаційного процесу, що повинні бути враховані в моделі для забезпечення її адекватності.

Однією з ключових особливостей програмно-визначеного радіо є спільне використання апаратних ресурсів для передачі та прийому сигналів, що в багатьох реалізаціях призводить до необхідності роботи в режимі часової дуплексної передачі. У такому режимі прийом і передача не можуть здійснюватися одночасно, а чергуються у часі відповідно до заданої структури кадру. Це обмеження безпосередньо впливає на доступність каналу передачі даних, часову структуру обміну даними та можливість безперервного моніторингу стану каналу.

Суттєвим апаратним обмеженням є також наявність затримок, пов'язаних із перебудовою робочої частоти, зміною режимів роботи передавача і приймача, а також із обробкою сигналів у цифровій частині програмно-визначеного радіо. Такі затримки не є сталими та залежать від конфігурації пристрою, швидкодії обчислювальних засобів і параметрів програмної реалізації. У межах імітаційної моделі ці затримки доцільно враховувати як часові інтервали, протягом яких канал передачі даних є частково або повністю недоступним для передачі даних.

Обмеження програмно-визначеного радіо проявляються також у скінченній смузі пропускання та дискретному характері налаштування

частотних параметрів. Це унеможливило довільний вибір робочих частот і вимагає врахування кроку перебудови та допустимих частотних діапазонів при формуванні сценаріїв функціонування каналу передачі даних. У результаті спектральні параметри каналу та навмисних завад набувають кусково-сталого характеру, що повинно бути відображено в імітаційній моделі.

З урахуванням зазначених особливостей програмно-визначене радіо в межах даної роботи розглядається не як окремий технічний засіб, а як джерело апаратних обмежень, що визначають допустимі режими функціонування каналу передачі даних. Такий підхід дозволяє абстрагуватися від конкретної реалізації пристрою, зберігаючи при цьому ключові обмеження, які впливають на часову та частотну структуру процесів передачі даних.

Таким чином, врахування апаратних обмежень програмно-визначеного радіо є необхідною умовою побудови адекватної імітаційної моделі каналу передачі даних. Врахування режиму часової дуплексної передачі, затримок перебудови та обмежень частотних параметрів забезпечує узгодженість моделі з реальними умовами функціонування безпроводних систем передачі інформації та створює передумови для подальшого аналізу моделей помилок передачі даних у нестационарних умовах.

Особливості апаратної реалізації на USRP B200 mini та USRP B210

У межах даного дослідження апаратна основа програмно-визначеного радіо розглядається на прикладі платформ USRP B200 mini та USRP B210 як типових представників класу USB-підключених SDR-пристроїв, придатних для експериментального відтворення інформаційних процесів у безпроводних системах передачі даних. Водночас ці платформи не є апаратно еквівалентними: відмінності їх радіочастотної частини зумовлюються використанням різних інтегрованих трансиверів (RFIC), що безпосередньо визначає кількість незалежних передавальних і приймальних трактів, можливості одночасної передачі та прийому, а також потенційні режими просторової обробки сигналів.

USRP B200 mini реалізовано як компактну 1×1 платформу, у якій радіочастотний фронтенд побудовано на базі RFIC Analog Devices AD9364.

Застосування AD9364 визначає одноканальну конфігурацію з одним передавальним і одним приймальним каналом, а також миттєву смугу пропускання до 56 МГц, що є достатнім для широкого класу дослідницьких задач комп'ютерного моделювання каналу, проте обмежує апаратну підтримку багатоканальних режимів на рівні радіочастотної частини. У контексті імітаційної моделі це означає, що сценарії з паралельним прийомом у кількох просторових гілках або з когерентною MIMO-обробкою мають розглядатися як окремі розширення, які не є нативними для цієї апаратної конфігурації.

USRP B210, на відміну від B200 mini, є двоканальною платформою 2×2 і позиціонується як прототипна апаратна база для RFIC Analog Devices AD9361. Використання AD9361 забезпечує наявність двох передавальних і двох приймальних ланцюгів у межах одного трансивера, що створює апаратні передумови для реалізації одночасної передачі та прийому, а також когерентних режимів багатоканальної обробки, коли узгодженість трактів може використовуватися для MIMO-застосувань або просторового аналізу сигналів. Саме ця різниця між AD9361 і AD9364 є принциповою для коректного опису апаратних можливостей: у випадку B210 модель може бути параметризована так, щоб відображати як одноканальну конфігурацію, так і двоканальні режими, залежно від цілей експерименту та прийнятих припущень.

Попри наведені відмінності на апаратному рівні, для задач імітаційного комп'ютерного моделювання важливо розмежувати «апаратну можливість» і «режим, який фактично враховується в моделі». Навіть якщо платформа підтримує повнодуплексну роботу, у межах конкретної програмної організації експерименту, обмежень потокової обробки та синхронізації, а також при необхідності відтворити часову структуру доступу до каналу, допустимо моделювати обмін як часово розділений, коли інтервали передачі та прийому чергуються. Таке припущення не заперечує апаратної повнодуплексності B210, а використовується як спосіб формалізувати затримки переналаштувань, інтервали часткової недоступності каналу та вплив часової організації обміну на цілісність даних, що є суттєвим саме для аналізу інформаційних процесів.

Додатковою спільною для обох платформ особливістю є наявність затримок, пов'язаних із цифровою обробкою сигналів, передаванням потоків даних через USB-інтерфейс та зміною конфігураційних параметрів (частоти, смуги пропускання, рівнів підсилення). У межах моделі такі затримки доцільно відображати як часові інтервали, які впливають на структуру інформаційного обміну та можуть спричиняти короткочасне погіршення умов прийому або втрати фрагментів даних при зміні режимів. Водночас відмінності між B200 mini і B210, зумовлені AD9364 та AD9361 відповідно, визначають різний «запас» апаратних можливостей щодо паралельності трактів і, як наслідок, різний потенціал масштабування моделі на багатоканальні застосування. Урахування цієї різниці дозволяє коректно формувати припущення імітаційної моделі, пов'язуючи її параметри з реалістичними апаратними можливостями та обмеженнями відповідної платформи.

Зазначимо, що хоча платформа USRP B210 апаратно підтримує повнодуплексний режим роботи з одночасною передачею та прийомом сигналів, у межах даного дослідження режим доступу до каналу визначається як модельне припущення, зумовлене організацією імітаційного експерименту та необхідністю коректного врахування часової структури обробки, затримок перебудови та обмежень програмної реалізації. Такий підхід не обмежує загальності розробленої моделі, оскільки повнодуплексний режим може бути розглянутий як окремий випадок її параметризації.

2.5 Модель помилок передачі даних у нестаціонарних умовах

Функціонування каналу передачі даних безпроводних систем передачі інформації в умовах динамічної зміни параметрів середовища та дії навмисних завад зумовлює складний характер виникнення помилок передачі. На відміну від стаціонарних каналів, для яких імовірність помилки може вважатися сталою або повільно змінною, у нестаціонарних умовах помилки виникають нерівномірно в часі та мають виражену залежність від поточного стану каналу. У зв'язку з цим

модель помилок повинна враховувати часову структуру порушень та відображати змінність характеристик передачі даних.

Однією з характерних особливостей помилок у нестационарному каналі передачі даних є їх кластерний, або переривчастий, характер. У таких умовах помилки не розподіляються рівномірно по всьому потоку даних, а концентруються в окремих часових інтервалах, що відповідають періодам погіршення умов передачі. Такий тип помилок часто описується як *bursty errors* і є типовим для каналів, що зазнають дії завад зі змінними часовими та спектральними параметрами.

У межах імітаційної моделі каналу передачі даних помилки передачі інформації розглядаються як результат зміни ефективних параметрів каналу, зокрема співвідношення сигнал/шум та рівня зашумлення в робочій смузі частот. Зменшення співвідношення сигнал/шум унаслідок дії навмисних завад призводить до різкого зростання ймовірності виникнення бітових помилок протягом обмежених часових інтервалів, тоді як у періоди відсутності або ослаблення завад канал може функціонувати з прийнятним рівнем якості.

Модель помилок у даній роботі ґрунтується на поданні ймовірності виникнення бітових помилок як часово змінної величини, що відображає поточний стан каналу передачі даних. Такий підхід дозволяє враховувати нерівномірний розподіл помилок у часі та коректно описувати процеси накопичення спотворень у переданих даних. При цьому окремі фрагменти інформаційного потоку можуть зазнавати суттєво більшого рівня спотворень порівняно з середнім значенням для всього інтервалу спостереження.

Зазначені особливості моделі помилок мають принципове значення для оцінювання цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації. Використання лише миттєвих або усереднених показників якості передачі не дозволяє адекватно відобразити вплив переривчастих завад, оскільки такі показники не враховують часову концентрацію помилок та їх накопичений ефект. У зв'язку з цим у межах імітаційної моделі доцільним є застосування

підходів, що дозволяють оцінювати цілісність даних з урахуванням часової структури помилок.

Таким чином, модель помилок передачі даних у нестационарних умовах, що враховує переривчастий характер спотворень та часову змінність параметрів каналу, є невід'ємною складовою узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних. Застосування такої моделі створює основу для подальшого аналізу накопиченого впливу помилок на цілісність інформації та для використання інтегральних показників якості передачі при дослідженні ефективності алгоритмічних методів, що розглядається в наступних розділах роботи.

Поняття цілісності даних у контексті безпроводного каналу керування

У телекомунікаційних системах, зокрема в контексті задач кібербезпеки та інформаційної безпеки, цілісність даних (*data integrity*) розглядається як здатність системи передачі забезпечувати доставку інформації без спотворень, втрат або несанкціонованих модифікацій. У безпроводних каналах керування цільових систем це означає, що отримане повідомлення, зокрема корисне навантаження кадру або окрема команда керування, є ідентичним переданому з урахуванням застосування механізмів виявлення та корекції помилок, таких як циклічний надлишковий код (CRC), контрольні суми та інші засоби забезпечення достовірності передачі інформації [12; 83; 89].

Для каналу керування цілісність даних має вагоме значення, оскільки втрата або спотворення одного біта може призвести до некоректної інтерпретації команди, а відсутність своєчасного виявлення помилки може стати причиною помилкових дій цільової системи. Швидкість реакції системи на погіршення цілісності визначає, чи вдасться зберегти керованість цільовою системою за присутності навмисного завадового впливу.

Для оцінки цілісності може аналізуватися правильність відтворення окремих бітів через параметр *BER* (Bit Error Rate), може аналізуватися ймовірність пошкодження кадру *FER* (Frame Error Rate), а якщо у кадрі

передається кілька логічних повідомлень (команд) – може визначатися, чи кожне з них прийнято без помилок.

У реальних системах зв'язку, зокрема в БпЛА як цільовій системі, неможливо напряду обчислювати BER , бо приймач не має доступу до точних бітів, які були передані. Натомість застосовується контрольна сума CRC (Cyclic Redundancy Check) або аналогічний код виявлення помилок, і відстежується частка повідомлень, які не пройшли перевірку CRC . Загальна логіка при цьому виглядає наступним чином:

- 1) передавач додає CRC до кожного повідомлення;
- 2) приймач перевіряє CRC після декодування повідомлення;
- 3) якщо CRC неправильна – повідомлення вважається помилковим;
- 4) після аналізу певної кількості кадрів обчислюється:

$$CRC\ Error\ Rate = \frac{\text{Кількість повідомлень з } CRC - \text{помилкою}}{\text{Загальна кількість прийнятих повідомлень}}$$

Це значення використовується замість BER у системах без знання коректного повідомлення. Нижче наведено формалізовані показники цілісності даних саме для даної імітаційної моделі, де *еталонні біти відомі* (є доступ до `MessageBits` на передачі й відновлених бітів на прийомі). Це дає змогу вимірювати *істинний* BER і похідні від нього метрики без посередніх оцінок через CRC .

По-перше, для кожного кадру (пакету команд) з полем корисного навантаження довжиною N біт (в даній моделі $N=1540$) обчислюється кількість бітових помилок

$$e_k = \sum_{i=1}^N 1\{b_i^{(tx,k)} \oplus b_i^{(rx,k)} = 1\},$$

де e_k – кількість бітових помилок у кадрі з номером k ;

N – кількість бітів у кадрі (довжина кадру);

$b_i^{(tx,k)}$ та $b_i^{(rx,k)}$ – відповідно переданий та відновлений i -й біт.

Покадровий BER дорівнює:

$$BER_k = \frac{e_k}{N}.$$

По-друге, для інтервалу з K кадрів вводиться сукупний BER як:

$$\overline{BER} = \frac{\sum_{k=1}^K e_k}{KN}.$$

По-третє, цілісність на рівні повідомлення (пакету команд) характеризується ймовірністю помилки кадру PER (*Packet Error Rate*):

$$I_k = 1\{e_k > 0\}, \quad PER = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_k.$$

Це частка прийнятих кадрів, у яких виявлено хоча б одну бітову помилку (тобто кадр не вважається цілісним).

PoI (*Probability of Integrity*) – ймовірність збереження цілісності кадру. Це ймовірність того, що кадр прийнятий без жодної бітової помилки. Визначається як:

$$PoI = 1 - PER.$$

У цьому випадку PER показує, як часто система втрачає цілісність кадру, а PoI – це показник надійності прийому, прямо пов'язаний з цілісністю даних.

2.6 Узагальнена імітаційна модель каналу передачі даних

На основі розглянутих особливостей каналу передачі даних безпроводних систем передачі інформації, моделі навмисних завад, параметрів їх впливу, апаратних обмежень програмно-визначеного радіо та моделі помилок у нестационарних умовах формується узагальнена імітаційна модель каналу передачі даних. Така модель призначена для відтворення інформаційних процесів передачі даних у динамічному середовищі та забезпечує можливість дослідження впливу дестабілізуючих факторів на цілісність інформації без прив'язки до конкретної апаратної реалізації.

Узагальнена імітаційна модель розглядає канал передачі даних як сукупність взаємопов'язаних компонентів, що визначають умови формування, передачі та прийому даних. До складу моделі входять блоки, які описують джерело даних і формування сигналу, середовище передачі з урахуванням нестационарних параметрів, модель навмисних завад зі змінною часовою та спектральною структурою, а також модель помилок передачі, що відображає переривчастий характер спотворень. Взаємодія цих компонентів у часі визначає поточний стан каналу передачі даних та якість передачі інформації.

Особливістю узагальненої моделі є врахування апаратних обмежень програмно-визначеного радіо як факторів, що впливають на часову та частотну структуру інформаційних процесів. До таких факторів належать затримки перебудови параметрів, обмеження смуги пропускання, дискретність частотних налаштувань та особливості організації доступу до каналу. У межах моделі ці обмеження не розглядаються як жорсткі технічні заборони, а формалізуються у вигляді параметрів, що задають допустимі режими функціонування каналу.

Узагальнена імітаційна модель дозволяє відтворювати різноманітні сценарії функціонування каналу передачі даних, що відрізняються інтенсивністю та часовою структурою навмисних завад, характером зміни параметрів середовища та умовами доступу до каналу. При цьому модель зберігає можливість параметризації, що дає змогу змінювати значення ключових характеристик без зміни її загальної структури. Такий підхід є доцільним для дослідження інформаційних процесів у безпроводних системах передачі даних у широкому діапазоні умов.

Важливою властивістю узагальненої імітаційної моделі є її орієнтація на аналіз цілісності даних як інтегральної характеристики інформаційного процесу. З урахуванням нестационарного характеру каналу та переривчастих помилок передачі модель створює передумови для оцінювання накопиченого впливу завад і порушень на якість передачі інформації у часовому вимірі. Це дозволяє уникнути обмежень, пов'язаних із використанням лише миттєвих показників якості.

Таким чином, узагальнена імітаційна модель каналу передачі даних поєднує в собі формалізований опис нестационарного каналу передачі даних, моделі навмисних завад, апаратні обмеження програмно-визначеного радіо та модель помилок передачі. Побудована модель є адекватною основою для проведення верифікації її коректності та для подальшого дослідження алгоритмічних методів забезпечення цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання.

2.6.1 Формування параметрів імітаційної моделі каналу зв'язку

У моделі на рисунку 2.5 схематично зображено структуру безпроводного каналу зв'язку цільової системи (БпЛА) в умовах навмисного завадового впливу від засобу пригнічення (засобу РЕБ). Її метою є вивчення поведінки безпроводного каналу керування (як прикладної області) під час пригнічення сигналу від ПО.

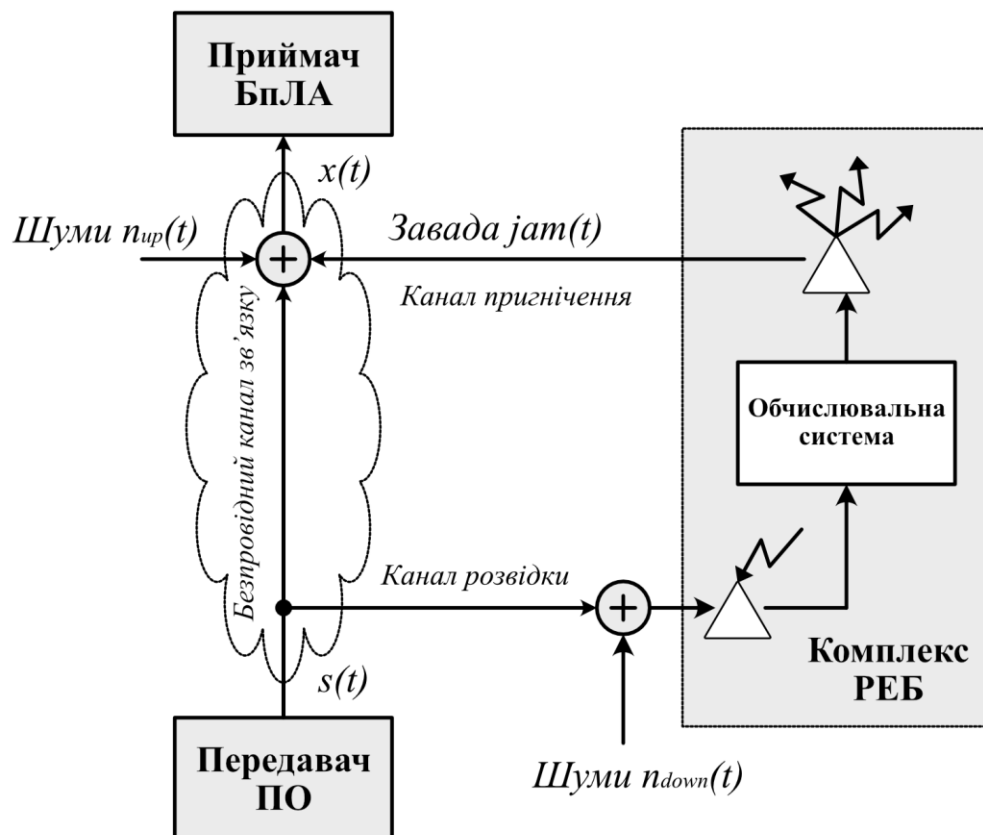


Рисунок 2.5 – Схемне представлення моделі для дослідження характеристик безпроводного каналу зв'язку в умовах застосування засобу навмисного завадового впливу

Передавач ПО (пульта оператора) генерує керуючий сигнал $s(t)$, який передається через безпроводний канал зв'язку до приймача БПЛА. В каналі зв'язку присутні власні шуми середовища $n_{up}(t)$, що додаються до сигналу. Крім того, у систему втручається завада $jam(t)$, яка надходить від комплексу РЕБ. Завада передається по каналу пригнічення, що забезпечує створення завад на частоті або у діапазоні дії сигналу $s(t)$. Таким чином, на вхід приймача БПЛА надходить сумарний сигнал:

$$x(t) = s(t) + jam(t) + n_{up}(t)$$

Для генерації завади, комплекс РЕБ повинен отримати інформацію про характеристики сигналу керування. Це здійснюється за допомогою приймача комплексу, який приймає сигнал $s(t)$, спотворений шумами $n_{down}(t)$, через канал розвідки. На основі прийнятого сигналу обчислювальна система комплексу ідентифікує його параметри (наприклад, частоту, модуляцію, потужність) і передає їх до засобу пригнічення, який синтезує відповідну заваду $jam(t)$.

Така модель дозволяє:

- моделювати ситуації з різними типами завад (широкосмугові, вузькосмугові, імпульсні);
- оцінювати вплив параметрів завади на ймовірність втрати зв'язку;
- вивчати вплив співвідношень сигнал/шум та сигнал/завада на точність прийому команд;
- розробляти стратегії адаптації системи керування до умов навмисного завадового впливу.

Для реалізації імітаційної моделі передавача та приймача каналу передачі даних використовувалось програмне середовище MATLAB [35]. За основу структурної побудови моделі було взято бібліотечний приклад передавача і приймача з модуляцією QPSK, наведений у довідковій системі MATLAB [97], який демонструє типові підходи до розв'язання практичних задач безпроводного зв'язку, зокрема компенсацію зсуву несучої частоти та фази, відновлення синхронізації в приймачі й синхронізацію кадрів [16].

На базі зазначеного бібліотечного прикладу автором розроблено узагальнену імітаційну модель каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів (рис. 2.6).

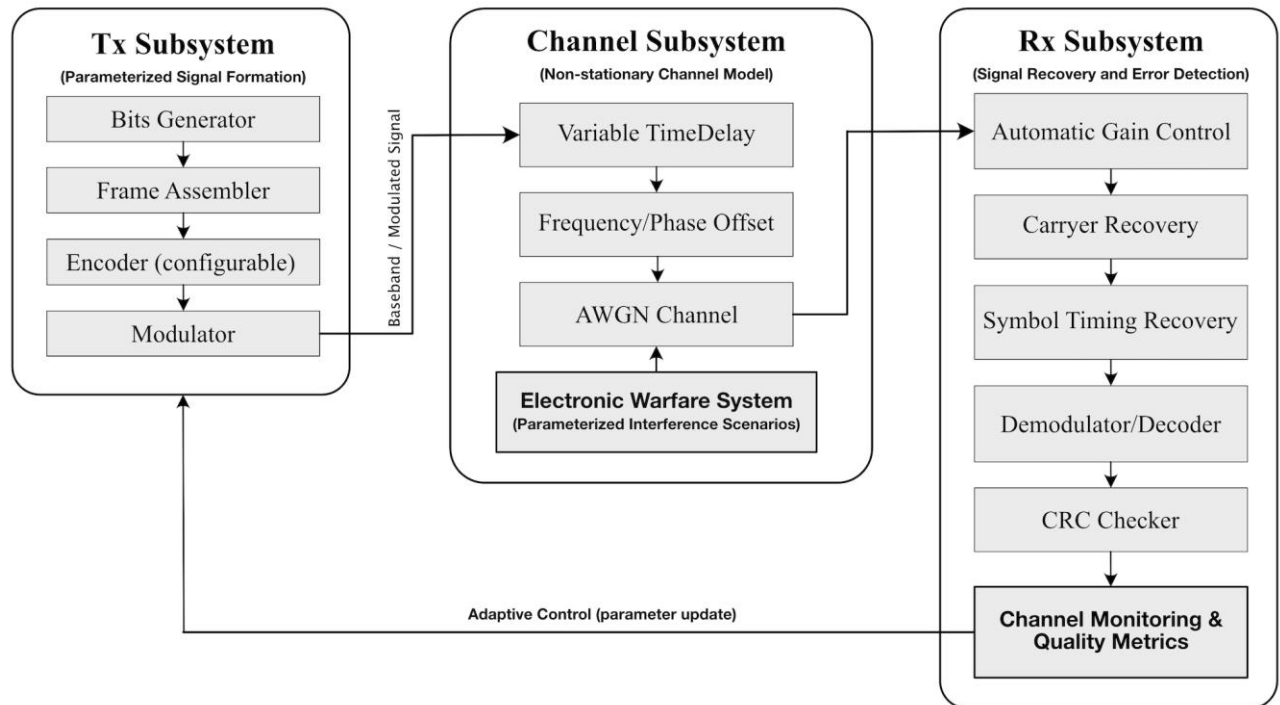


Рисунок 2.6 – Структурна схема узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів

Наукова новизна даної моделі полягає в тому, що вона, на відміну від відомих, забезпечує моделювання процесів передавання даних в умовах навмисних впливів шляхом інтеграції параметризованих моделей каналу, середовища та дестабілізуючих впливів, описаних сценаріями функціонування, у межах єдиної формалізованої структури, що дозволяє реалізувати сценарно-орієнтоване моделювання функціонування каналу та обґрунтовувати вибір адаптивних стратегій керування.

У даній роботі під сценарно-орієнтованим моделюванням розуміється підхід до дослідження процесів передачі даних, за якого функціонування системи відтворюється у вигляді формалізованих у часі сценаріїв, що задають зміну параметрів каналу, середовища та дестабілізуючих впливів, і забезпечують

можливість аналізу поведінки системи та оцінювання ефективності адаптивних алгоритмів у різних умовах її функціонування.

Під параметризованими моделями розуміються моделі процесів передачі даних, у яких поведінка системи описується через сукупність змінних параметрів, що визначають характеристики каналу передачі даних, середовища та завадових впливів, і можуть варіюватися в часі або задаватися відповідно до умов моделювання, забезпечуючи відтворення різних режимів функціонування системи та аналіз її ефективності.

Базову модель розширено з урахуванням ефектів, характерних для безпроводних каналів зв'язку з рухомими об'єктами, а також впливу навмисних дестабілізуючих факторів. У моделі імітуються фазові та частотні зсуви, часові затримки, що змінюються в часі (блоки «Variable Time Delay» та «Frequency/Phase Offset» підсистеми «Channel Subsystem») для відтворення порушень синхронізації між передавачем і приймачем, а також змінний вплив адитивного білого гаусівського шуму AWGN під керуванням системи «Electronic Warfare System», яка реалізує параметризовані сценарії зовнішніх впливів. Навмисні дестабілізуючі впливи не моделюються як конкретний пристрій або алгоритм противника, а задаються у вигляді узагальнених сценаріїв зміни параметрів середовища (рівень шуму, зсув частоти, затримки тощо). Це дозволяє досліджувати не окремий випадок, а клас можливих впливів, що є принципово важливим у задачах аналізу стійкості інформаційних процесів.

Розроблена узагальнена імітаційна модель дозволяє розглядати сигнально-кодові конструкції не як фіксований елемент системи, а як параметризовану складову інформаційного процесу, що може змінюватися залежно від умов функціонування каналу. У контексті досягнення мети дослідження (забезпечення цілісності даних у безпроводному каналі) така модель створює можливість адаптивної зміни структури керуючих повідомлень пульта оператора шляхом варіювання довжини команд керування, форматів і протоколів передачі даних (реалізовано в блоках «Bits Generator» та «Frame Assembler» підсистеми «Tx Subsystem»), застосування різних методів

завадостійкого кодування, зокрема турбокодів і блокових кодів (реалізовано в «Encoder»), вибору типу модуляції та використання методів розширення спектра (реалізовано в «Modulator») [4].

З точки зору представлення результатів і метрик модель не обмежується окремими показниками якості, а формує універсальну систему оцінювання цілісності даних, яка може бути використана незалежно від конкретного способу реалізації фізичного рівня або протоколів обміну (реалізовано в блоці «Channel Monitoring & Quality Metrics» підсистеми «Rx Subsystem»). Це дозволяє використовувати одну й ту саму модель для аналізу різних алгоритмів керування та різних конфігурацій системи.

Запропонована узагальнена імітаційна модель каналу передачі даних не орієнтована на відтворення конкретної технічної реалізації або окремого типу системи зв'язку, а описує більш широкий клас інформаційних процесів передачі даних у нестаціонарному середовищі з навмисними дестабілізуючими впливами. Узагальненість у даному випадку має методологічний характер і проявляється на рівні структури моделі, способу задання параметрів та принципів її використання в комп'ютерному експерименті. Основні характеристики процесу передачі даних (енергетичні, часові, частотні, сигнально-кодові) задаються у вигляді змінних параметрів або профілів, що можуть довільно змінюватися у часі. Це дозволяє відтворювати широкий спектр умов функціонування, від квазістаціонарних до різко нестаціонарних, без зміни самої структури моделі. Таким чином, модель не «жорстко прив'язана» до конкретних значень параметрів, а визначає лише правила їх взаємодії. Хоча в моделі враховуються обмеження апаратної платформи програмно-визначеного радіо, вони подаються у вигляді параметрів і обмежень, а не жорстко закладених технічних характеристик конкретного пристрою. Це забезпечує переносимість результатів і можливість застосування моделі до різних апаратно-програмних реалізацій.

Запропонована узагальнена модель виступає не лише інструментом відтворення процесів, а й формалізованою основою для синтезу алгоритмів. Оскільки вона описує канал передачі даних як динамічну систему станів під дією

керування і зовнішніх впливів, її структура безпосередньо використовується для побудови адаптивних алгоритмів, які оперують цими станами та параметрами. Саме ця властивість відрізняє запропоновану модель від прикладних або вузькоспеціалізованих моделей, призначених лише для імітації окремих ефектів.

Структурна схема, наведена на рисунку 2.7, деталізує передавальну підсистему узагальненої імітаційної моделі каналу передачі даних (рис. 2.6) та використовується для формалізації параметризованого формування сигнально-кодкових конструкцій у межах комп'ютерного моделювання. Команди керування формуються контролером програмного забезпечення та надходять до передавача у вигляді потоку бітів, який у даній конфігурації моделі формується у блоці «Bits Generation».

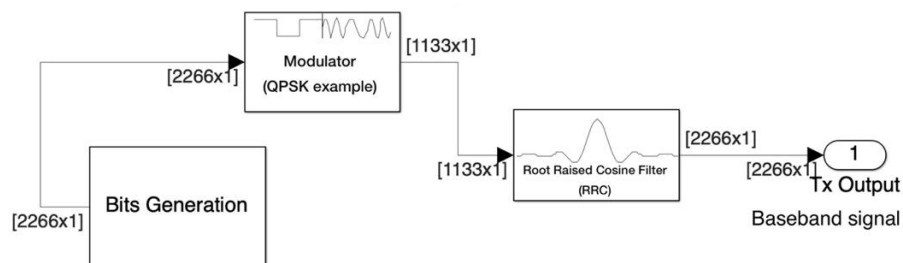


Рисунок 2.7 – Схемне представлення моделі передавача ПО

Модуляція QPSK та фільтр імпульсів, показані на схемі, використовуються як приклад сигнально-кової реалізації та можуть бути замінені іншими типами модуляції, кодування і формування сигналу залежно від умов функціонування каналу та вимог до забезпечення цілісності даних [10].

Для наглядності, у вигляді команд керування в межах імітаційного моделювання використовуються текстові повідомлення типу «TestCommand 001», сформовані за допомогою таблиці символів ASCII, яка передбачає використання 7 інформаційних біт на символ. Зазначений формат повідомлень застосовується як приклад сигнально-кової конфігурації та не обмежує можливість використання інших форматів представлення керуючої інформації.

Довжина повідомлень у вибраній конфігурації складає 16 символів, тобто 112 біт. В одному кадрі передається 20 повідомлень, у результаті чого

повідомлення кадру утворюють вектор-стовпець із 2240 бітів (рис. 2.8). Такий підхід дозволяє параметризувати структуру кадру шляхом зміни довжини команд керування та кількості повідомлень у кадрі залежно від умов функціонування каналу.

Скремблер виконує мультиплікативне скремблювання вхідних даних з метою зменшення довжини послідовних нулів або одиниць у передаваному сигналі, оскільки тривалі однорідні бітові послідовності можуть призводити до погіршення процесів синхронізації в приймачі.

Для пришвидшення початкового етапу імітаційного моделювання кількість передаваних кадрів у даній конфігурації було скорочено до 100. Загальна тривалість тестової передачі при цьому становить 32 000 інформаційних символів. На приймальному боці виконується побітове порівняння повідомлень, що надійшли з каналу зв'язку, з еталонними повідомленнями, сформованими аналогічним чином у приймачі, на основі чого обчислюється коефіцієнт бітових помилок *BER*.

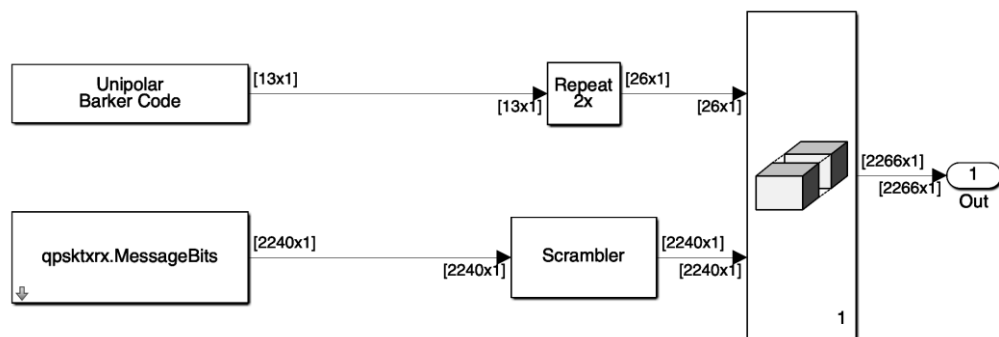


Рисунок 2.8 – Структурна схема формування параметризованого бітового потоку даних у передавальній підсистемі імітаційної моделі каналу передачі даних (рис. 2.6)

Для кадрової синхронізації використовується в якості заголовка кадру найдовший із кодів Баркера, довжиною 13 знаків:

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1],$$

який попередньо переводиться в однополярну форму та повторюється двічі. На етапі конкатенації заголовок кадру поєднується з його корисним

навантаженням – командами керування, формуючи таким чином бітовий потік даних передавача, структура якого може змінюватися відповідно до обраної сигнально-кодової конфігурації (рис. 2.8).

Бітовий потік надходить на QPSK-модулятор, а далі, для зменшення міжсимвольної інтерференції, проходить через фільтр кореневого піднесеного косинуса (Root Raised Cosine Filter), який має коефіцієнт згортання 0,5 й подвоює модульовані символи (рис. 2.7).

Для забезпечення стабільного керування цільовою системою в умовах навмисного завадового впливу в межах імітаційної моделі враховується необхідність забезпечення мінімальної швидкості передачі даних у каналі керування, яка гарантує своєчасну доставку команд та відповідей. Команди керування характеризуються критичною допустимою затримкою (RTT – Round Trip Time), що обмежує час реакції системи на зміну умов каналу, зокрема на виявлення завади та перемикання робочої частоти. Типові пакети команд керування невеликі (кілька десятків байтів), але їх передача повинна здійснюватися з високою надійністю навіть за наявності дестабілізуючих впливів.

Розроблена імітаційна модель передбачає можливість використання різних схем модуляції (зокрема QPSK, 16-QAM) та варіювання швидкості передачі даних з метою формалізації впливу параметрів фізичного рівня на цілісність команд керування у процесі передачі. Така параметризація моделі створює основу для подальшого дослідження граничних умов працездатності каналу керування в умовах завад без фіксації конкретних числових значень на етапі побудови моделі.

Для розрахунку необхідної швидкості передачі даних в каналі керування було взято до уваги протокол MAVLink (*Micro Air Vehicle Link*) – легкий, двійковий комунікаційний протокол, який використовується для обміну повідомленнями між БПЛА та наземними станціями керування. Параметри його каналу керування залежать від конкретної реалізації, однак можна виділити типові значення, що характерні для практичного використання MAVLink у

системах БПЛА з обмеженим радіресурсом [43]. Довжина повідомлення складає від 8 до 263 байт (команди керування, телеметрія, діагностика зазвичай передаються в пакеті розміром 20 – 50 байт). Повідомлення можуть передаватись до 50 разів на секунду, в залежності від критичності потоку. Типовий обсяг uplink-трафіку протоколу MAVLink наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Типовий uplink-трафік у реальному часі

Потік	Частота (Гц)	Об'єм (байт/повідомлення)	Швидкість (кбіт/с)
MANUAL_CONTROL	20	20	3.2
HEARTBEAT	1	9	0.072
SET_ATTITUDE_TARGET	10	40	3.2
MISSION_ITEM	подієво	30	<0.1
Разом (типово)	—	—	≈6–10 кбіт/с

Uplink-канал призначений для передачі керуючих впливів (ручних або автоматичних) з наземної станції керування на борт БПЛА. Найбільш навантаженими в uplink-каналі є потоки ручного та автоматичного керування положенням, які характеризуються підвищеною частотою оновлення та малими розмірами повідомлень.

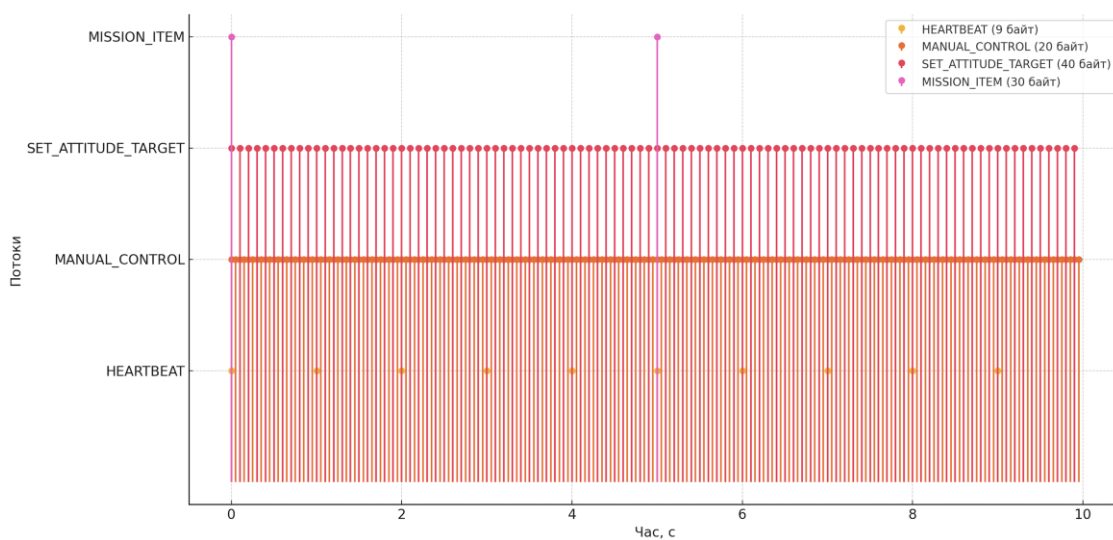


Рисунок 2.9 – Часові діаграми uplink-трафіку протоколу MAVLink

На рисунку 2.9 наведено часові діаграми основних uplink-потоків протоколу MAVLink протягом інтервалу спостереження 10 секунд. Кожен

імпульс на діаграмі відповідає передачі окремого повідомлення відповідного типу. Частота формування повідомлень визначається типом потоку: зокрема, повідомлення `MANUAL_CONTROL` передаються з частотою 20 разів на секунду, тоді як повідомлення `HEARTBEAT` – один раз за секунду.

Подані часові діаграми дозволяють наочно оцінити часову структуру навантаження `uplink`-каналу в режимі реального часу та використовуються для обґрунтування параметрів імітаційної моделі каналу керування. На їх основі в моделі приймаються орієнтовні значення пропускної здатності `uplink`-каналу, достатні для передачі керуючих команд у різних режимах керування, включно з розширеними функціями.

У межах імітаційного моделювання швидкість передачі символів передавальної системи задається на рівні 50 тис. символів за секунду, а частота дискретизації сигналу після формуючого фільтра становитиме 100 тис. відліків за секунду. Зазначені значення використовуються як параметри конфігурації моделі та можуть змінюватися при дослідженні інших сценаріїв функціонування каналу керування.

Для моделювання каналу передачі даних у роботі використовується підхід, що враховує реалістичні характеристики безпроводного середовища, зокрема наявність затримок поширення сигналу, частотних і фазових зсувів, а також шумових і завадових впливів. Підсистема «AWGN-канал зі зміщенням частоти і змінною затримкою» на першому етапі застосовує до передаваного сигналу зсув несучої частоти та заданий фазовий зсув, що дозволяє формалізувати ефекти нестабільності генераторів і відносного руху передавача та приймача.

На наступному етапі до сигналу додається змінна затримка, параметри якої визначаються окремим генератором затримки та можуть змінюватися в часі. У межах імітаційної моделі передбачено використання двох типів часової затримки:

- рампова затримка, яка ініціалізується на заданому рівні відліків і лінійно зростає з визначеною швидкістю у кожному кадрі до досягнення граничного значення, що відповідає довжині одного кадру;

– трикутна затримка, яка лінійно змінюється в заданому діапазоні значень між мінімальним і максимальним рівнями з фіксованою швидкістю у кожному кадрі.

Використання декількох типів змінної затримки дозволяє формалізувати ефекти багатопроменевого поширення сигналу та флуктуацій часу його доставки, а також створює умови для аналізу впливу часових спотворень на процеси синхронізації в приймальній частині системи, зокрема на роботу синхронізатора символів.

Після внесення часових і частотних спотворень сигнал надходить до блоку «AWGN-канал», у якому до нього додається білий гаусівський шум. Керування рівнем шуму здійснюється за допомогою підсистеми «ECM Interference Profile», яка формує поточне значення відношення E_b/N_0 на основі заданої матриці сценарію завад. Термін Electronic Countermeasure (ECM) system використовується для позначення активних завадових впливів, спрямованих на зниження ефективності роботи систем зв'язку, і в межах даної моделі розглядається як складова загальної системи завадового впливу.

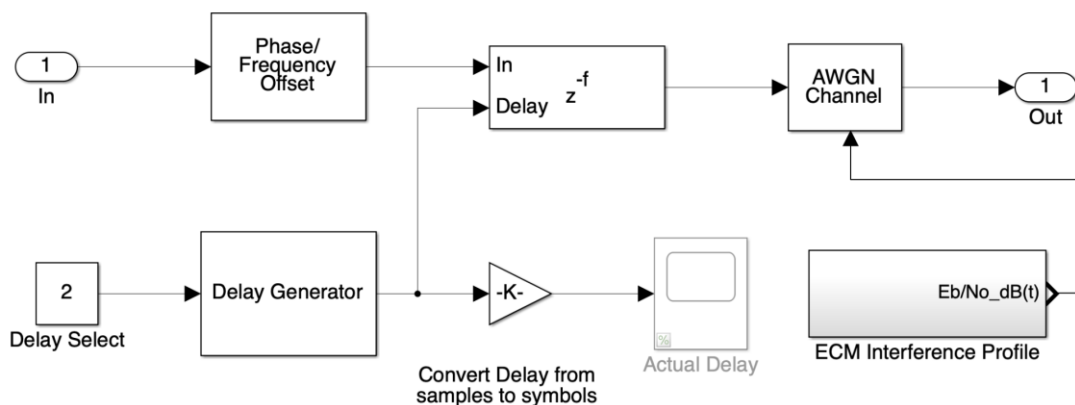


Рисунок 2.10 – Структурна схема параметризованої підсистеми AWGN-каналу зі зміщенням частоти та змінною часовою затримкою в складі імітаційної моделі каналу передачі даних

Імітаційна модель AWGN-каналу з параметризованими часовими, частотними та шумовими характеристиками, що дозволяє відтворювати різні

алгоритмів обробки прийнятих даних і підрахунку бітових помилок. Це дозволяє використовувати коефіцієнт бітових помилок *BER* як узагальнену метрику оцінювання цілісності даних у каналі керування та забезпечує можливість порівняльного аналізу різних конфігурацій і сценаріїв функціонування каналу передачі даних в межах комп'ютерного моделювання.

2.6.2 Перевірка узгодженості параметрів імітаційної моделі

У даному підпункті виконується перевірка узгодженості параметрів імітаційної моделі каналу передачі даних з типовими умовами функціонування безпроводних систем передачі даних. Метою розгляду є підтвердження коректності вибору основних параметрів моделі та їх відповідності часовим і частотним масштабам інформаційних процесів, що аналізуються в роботі, без проведення оцінювання ефективності або порівняльного аналізу режимів роботи системи.

```

prmQPSKTxRx =
  struct with fields:
    ModulationOrder: 4
    Interpolation: 2
    Decimation: 1
    Rsym: 50000
    Tsym: 2.0000e-05
    Fs: 100000
    TotalFrame: 100
    BarkerCode: [1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1]
    BarkerLength: 13
    HeaderLength: 26
    Message: 'TestCommand'
    MessageLength: 16
    NumberOfMessage: 20
    PayloadLength: 2240
    FrameSize: 1133
    FrameTime: 0.0227
    RolloffFactor: 0.5000
    ScramblerBase: 2
    ScramblerPolynomial: [1 1 1 0 1]
    ScramblerInitialConditions: [0 0 0]
    RaisedCosineFilterSpan: 10
    PhaseOffset: 47
    EbNo: 12
    FrequencyOffset: 5000
    DelayType: 'Triangle'
    DesiredPower: 2
    AveragingLength: 50
    MaxPowerGain: 20
    MaximumFrequencyOffset: 6000
    PhaseRecoveryLoopBandwidth: 0.0100
    PhaseRecoveryDampingFactor: 1
    TimingRecoveryLoopBandwidth: 0.0100
    TimingRecoveryDampingFactor: 1
    TimingErrorDetectorGain: 5.4000
    PreambleDetectionThreshold: 20
    MessageBits: [11200x1 double]
    BerMask: [1540x1 double]

```

Рисунок 2.12 – Структура `prmQPSKTxRx`

Для формалізації параметрів передавально-приймальної частини імітаційної моделі використовується структура `prmQPSKTxRx`, яка містить сукупність параметрів модуляції, формування кадру, синхронізації, фільтрації та завадових впливів (рис. 2.12). Аналіз значень цих параметрів дозволяє перевірити їх внутрішню узгодженість і відповідність типових умов функціонування каналу керування безпроводних систем.

Дано:

- модуляція: QPSK – 2 біти/символ (оскільки *ModulationOrder* = 4, тобто $\log_2(4) = 2$);
- швидкість передачі символів: $R_{sym} = 50000$ символів/секунду;
- *Bit rate* (швидкість у бітах/с), обчислюється за формулою:

$$R_b = R_{sym} \times \log_2(M),$$

де R_b – швидкість передачі в бітах на секунду;

$R_{sym} = 50000$ – швидкість передачі символів;

$M = 4$ – порядок модуляції.

Обчислення:

$$R_b = 50000 \times \log_2(4) = 50000 \times 2 = 100000 \text{ біт/с}$$

Швидкість передачі інформації в цій моделі становить 100 000 біт/с (100 кбіт/с). Але це ідеальна теоретична швидкість, без урахування службової інформації. Якщо враховувати лише корисне навантаження (*PayloadLength*) у складі кадру, реальна ефективна швидкість буде трохи нижчою. Обчислимо ефективну швидкість передачі корисної інформації (*goodput*) у бітах за секунду з урахуванням структури кадру. Вихідні параметри для розрахунку (таблиця 2.3) візьмемо зі структури `prmQPSKTxRx`.

Кількість кадрів, яка передається за секунду:

$$N_{frames/sec} = \frac{1}{FrameTime} = \frac{1}{0,0227} \approx 44,05 \text{ кадра/с}$$

Кількість корисної інформації, що передається за секунду:

$$R_{eff} = N_{frames/sec} \times PayloadLength = 44,05 \times 2240 \approx 98672 \text{ біт/с}$$

Таблиця 2.3 – Основні параметри формування кадру радіоканалу керування

Параметр	Значення	Пояснення
Rsym	50000 символів/сек	Швидкість передачі символів
ModulationOrder	4	QPSK → 2 біти/символ
FrameSize	1133 символи	Повна довжина кадру
PayloadLength	2240 біт	Корисне навантаження в одному кадрі
FrameTime	0.0227 секунд	Тривалість одного кадру

Наведені розрахунки підтверджують узгодженість параметрів імітаційної моделі між собою та відповідність часових і швидкісних характеристик моделі типовим умовам функціонування каналу керування безпроводних систем. У моделі також передбачається наявність службових і контрольних елементів у складі повідомлень, що зменшує частку корисної інформації відносно теоретичного максимуму швидкості передачі.

Для імітаційної моделі приймача характерною є наявність перехідного процесу на етапі початкової синхронізації, під час якого відбувається встановлення робочих режимів блоків синхронізації символів і несучої. За умов фіксованого значення відношення E_b/N_0 , яке відповідає типовим режимам функціонування каналу, модель передбачає короткочасне збільшення кількості бітових помилок на початкових кадрах із подальшим переходом до сталого режиму роботи.

2.7 Математична модель каналу передачі даних як об'єкта адаптивного керування

Безпроводний канал керування цільовою системою в умовах навмисних завад формалізовано як динамічну систему з керуванням і збуреннями, що описується сукупністю сигнальної, енергетичної, ймовірнісної та часової моделей [11].

1. Модель сигналу в каналі

Миттєве значення сигналу на вході приймача цільової системи визначається як

$$r(t) = s(t, f_c, B, M, P_s) + j(t, f_j, B_j, P_j) + n(t),$$

де $s(t)$ – корисний сигнал,
 $j(t)$ – навмисна завада,
 $n(t)$ – адитивний білий гаусів шум (AWGN).

2. Спектральні параметри сигналів

Корисний сигнал характеризується:

– центральною частотою

$$f_c \in [f_{min}, f_{max}];$$

– смугою пропускання

$$B \leq B_{SDR};$$

– типом модуляції M , що визначає спектральну ефективність;

– частотним зсувом

$$\Delta f(t) = f_{real} - f_c,$$

який моделюється параметром `FrequencyOffset` та враховує нестабільність генераторів і доплерівський ефект.

Спектр навмисної завади описується функцією

$$S_j(f, t),$$

яка центрована відносно частоти $f_j(t)$ та має ширину смуги B_j .

Ефективність придушення визначається ступенем спектрального перекриття:

$$\eta(t) = \frac{|B \cap B_j|}{B}.$$

3. Енергетична модель

Миттєве відношення сигнал/шум визначається як

$$\gamma(t) = \frac{P_s(t)}{N_0 B + P_j(t)},$$

де N_0 – спектральна щільність шуму;

$P_j(t)$ – ефективна потужність завади у смузі B .

Таким чином, спектральні параметри безпосередньо впливають на енергетичний стан каналу через множник $N_0 B$ та коефіцієнт перекриття.

4. Модель ймовірності помилки

Ймовірність бітової помилки визначається як функція енергетичного стану:

$$P_b(t) = f_M(\gamma(t)),$$

зокрема для QPSK:

$$BER = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right).$$

5. Часова модель

Цикл керування описується затримкою (див. таблицю 3.4):

$$t_{KY} = t_{\phi ACK} + 2t_{ACK} + t_{pPB} + t_{прнПО},$$

що враховує часову динаміку прийняття рішення та переналаштування каналу.

6. Векторна форма моделі

Вектор стану:

$$x(t) = [\gamma(t), P_{b(t)}, t_{KY}(t)].$$

Вектор керування:

$$u(t) = [f_c, B, M, P_s].$$

Вектор дестабілізуючих впливів:

$$w(t) = [P_j(t), \Delta f(t)].$$

Вихід системи:

$$y(t) = Q_{data}(t),$$

де Q_{data} – інтегральний показник цілісності даних у процесі передачі.

7. Загальний вигляд динамічної системи

Подання каналу передачі даних у вигляді нелінійної динамічної системи

$$\dot{x}(t) = F(x(t), u(t), w(t)),$$

$$y(t) = G(x(t))$$

відповідає загальноприйнятому формалізму теорії автоматичного керування та аналізу динамічних систем [51; 86]. Функція G є оператором виходу, який перетворює вектор стану каналу передачі даних на інтегральний показник цілісності даних у процесі передачі, що використовується як критерій ефективності адаптивного керування.

8. Область допустимих керувань

Вектор керування належить множині допустимих керувань

$$u(t) \in \Omega_u:$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_c \in [f_{min}, f_{max}] \\ 0 < B \leq B_{SDR} \\ P_s \leq P_{max} \\ M \in \{BPSK, QPSK, 8PSK, \dots\} \end{array} \right.$$

9. Інтерпретація

Отримана математична модель:

- формалізує канал як динамічну систему з керуванням,
- явно враховує часові, енергетичні та спектральні параметри,
- описує спектральне перекриття з завадою,
- враховує частотний зсув і апаратні обмеження платформи SDR,
- створює строгий теоретичний базис для синтезу адаптивного алгоритму керування параметрами каналу передачі даних.

Висновки до розділу 2

1. У розділі розроблено узагальнену імітаційну модель каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, яка формалізує процес передачі даних як динамічний інформаційний процес та відображає повний цикл оброблення даних – від формування бітового потоку до приймання, синхронізації та оцінювання цілісності даних.

2. Побудовано параметризовану структурну модель передавальної підсистеми, що забезпечує формування сигнально-кодових конструкцій на основі реалістичних керуючих повідомлень. Показано, що структура повідомлень, кадрів і службових елементів може розглядатися як змінна складова інформаційного процесу, що забезпечує гнучкість моделювання.

3. Розроблено модель нестационарного каналу передачі даних, яка враховує часові, частотні та енергетичні збурення, а також навмисні дестабілізуючі впливи. Запропонований підхід дозволяє задавати широкий клас сценаріїв функціонування каналу без зміни структури моделі, що забезпечує її узагальнений характер.

4. У складі моделі реалізовано підсистему параметризованого задання завадових впливів, яка дозволяє формалізувати різні типи навмисного впливу як зовнішні сценарні збурення інформаційного процесу. Це забезпечує можливість системного дослідження деградації якості передачі даних у динамічних умовах.

5. Сформовано імітаційну модель приймальної підсистеми, яка забезпечує оброблення сигналу, синхронізацію та оцінювання показників якості передачі. Показано, що отримані метрики можуть бути використані для формалізації стану каналу з позиції цілісності даних.

6. Виконано перевірку узгодженості параметрів моделі, що підтвердила відповідність її часових і швидкісних характеристик типовим умовам функціонування систем передачі даних, а також коректність вибору параметрів для проведення комп'ютерного моделювання.

7. Побудовано математичну модель каналу передачі даних у вигляді нелінійної динамічної системи з керуванням і збуреннями, у якій стан каналу

описується сукупністю параметрів, що визначають якість і цілісність даних у процесі передачі. Визначено взаємозв'язки між параметрами каналу, зовнішніми впливами та показниками якості.

Узагальнений характер розробленої імітаційної та математичної моделей, їх параметризованість і незалежність від конкретної реалізації забезпечують можливість використання отриманої моделі як формалізованої основи для синтезу адаптивних алгоритмів керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, що розглянуто у розділі 3.

РОЗДІЛ 3. МЕТОД АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ НАВМИСНИХ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ВПЛИВІВ

3.1 Принципи адаптивного керування параметрами каналу передачі даних

У даному розділі розроблено метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, який базується на результатах комп'ютерного моделювання, отриманих у розділі 2, та визначає алгоритмічні правила прийняття рішень щодо зміни параметрів процесу передачі даних.

На відміну від статичних підходів, у яких параметри інформаційного обміну (частотні, часові та сигнально-кодові характеристики) залишаються незмінними, запропонований метод передбачає їх динамічну зміну відповідно до поточного стану каналу передачі даних та характеристик зовнішнього впливу. Такий підхід дозволяє розглядати процес передачі даних як керований інформаційний процес, що адаптується до змін середовища функціонування.

Під адаптивним керуванням параметрами каналу передачі даних в даній роботі розуміється сукупність алгоритмічних процедур оброблення даних і прийняття рішень, які забезпечують:

- безперервний моніторинг показників якості передачі даних (відношення сигнал/шум, імовірність бітових помилок, затримка, ефективність використання спектрального ресурсу);
- виявлення ознак дестабілізуючих впливів на основі аналізу змін параметрів інформаційного потоку;
- формування керуючих рішень щодо зміни параметрів передачі (робочих частот, смуги пропускання, виду модуляції, параметрів кодування та структури повідомлень);
- реалізацію адаптації з урахуванням часових обмежень, затримок обробки та апаратно-програмних особливостей системи.

Канал передачі даних у межах запропонованого підходу розглядається як динамічний об'єкт керування, стан якого визначається взаємодією керуючих алгоритмів системи передачі даних і зовнішніх дестабілізуючих впливів. Це дозволяє формалізувати задачу забезпечення цілісності даних як задачу адаптивного керування інформаційними процесами, що відповідає методології комп'ютерних наук та створює основу для подальшого синтезу алгоритмів прийняття рішень.

3.1.1 Розробка адаптивного методу вибору каналу зв'язку цільової системи, призначеного для протидії навмисному завадовому впливу

Розроблюваний метод протидії навмисному завадовому впливу передбачає використання скінченної множини каналів N_{ch} з шириною смуги пропускання $bw_{ch}(t)$. Канали знаходитимуться в різних частотних діапазонах від 400 МГц до 6 ГГц, що передбачатиме використання в трансиверах кількох антен на різні діапазони й антенних комутаторів.

Для імітаційної моделі виберемо загальну кількість каналів $N_{ch} = 256$, хоча, за необхідності, їх кількість може бути суттєво збільшена. Вважатимемо, що для каналу керування «вгору» буде достатньо смуги пропускання $bw_{ch}(t) = 1$ МГц. У загальному випадку ширина смуги пропускання може розглядатися як змінний параметр, однак у даній роботі для спрощення аналізу вона приймається фіксованою.

3.1.2 Метод задання пріоритетних каналів зв'язку під час передексплуатаційного програмування

Передбачається, що особа, яка займається експлуатацією партії БПЛА на певній ділянці відповідальності (далі – Відповідальний), матиме апріорні знання про реальну завантаженість радіочастотного спектра в даному регіоні й конкретні частоти, що використовуються тими чи іншими підрозділами. Тобто Відповідальний матиме можливість формувати сітку частот для каналів керування, виходячи із радіочастотної обстановки в конкретному регіоні, причому канали даної сітки частот можуть бути ранжовані по «бажаності» їх використання у першу чергу (наприклад, це можуть бути «стандартні» частоти

БпЛА, щоб без необхідності не видавати присутність апаратів з алгоритмами протидії засобам РЕБ) і аж до каналів «останньої черги» (різних проблемних каналів із завадової точки зору, а також каналів, залишених для роботи певних своїх підрозділів, каналів, що частково завантажені роботою радіозасобів противника тощо). Представляє інтерес використання каналів у частотному діапазоні, відведеному для потреб цифрового ефірного телебачення та повторне використання спектра, відведеного під радіозасоби противника (при роботі БпЛА на ворожій території).

У подальшому під Відповідальним розуміється уповноважений суб'єкт або автоматизована система планування, що здійснює передексплуатаційне налаштування параметрів каналу зв'язку.

Відповідальний, перед видачею комплексів БпЛА в експлуатацію, програмуватиме трансивери літальних апаратів та ПО, завантажуючи в них необхідні криптоалгоритми й ключові дані, а також сітку каналів з їх центральними частотами та пріоритетами використання, смугами пропускання, видом модуляції тощо.

Під час передексплуатаційного програмування формується масив параметрів

$$Inst = \{(n_{ch}, freq_{ch}, prior_{ch})\},$$

де n_{ch} (від 0 до $N_{ch}-1$) – порядкові номери каналів у масиві,

$freq_{ch}$ – центральні частоти каналів у Гц,

$prior_{ch}$ (від 0 до $N_{ch}-1$) – пріоритет каналу для використання.

На рисунку 3.1 наведено приклад розподілу пріоритетів каналів залежно від їхніх центральних частот у діапазоні 400 – 6000 МГц. Підвищені пріоритети надаються каналам, що належать до частотних діапазонів, які типово використовуються в системах керування БпЛА (зокрема 433 МГц, 868 МГц, 2,4 ГГц, 5,8 ГГц). Такий початковий розподіл пріоритетів формується на етапі передексплуатаційного програмування та використовується як вхідна інформація для адаптивного алгоритму вибору робочого каналу.

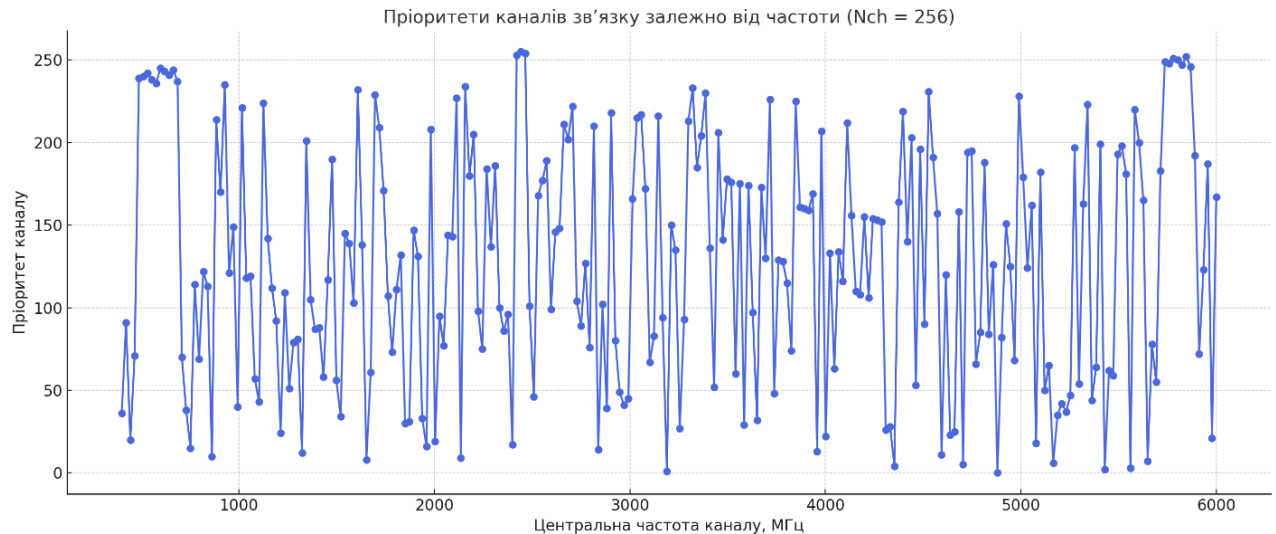


Рисунок 3.1 – Графічне зображення масиву каналів з пріоритетами їх використання

Для формалізації зовнішніх завадових умов, у яких має функціонувати адаптивний метод, у тому ж частотному діапазоні задається спектр завад від засобу пригнічення. На рисунку 3.2 наведено спектральне представлення завадової активності РЕБ-засобу «Периметр», побудоване на основі технічних характеристик, заявлених виробником.

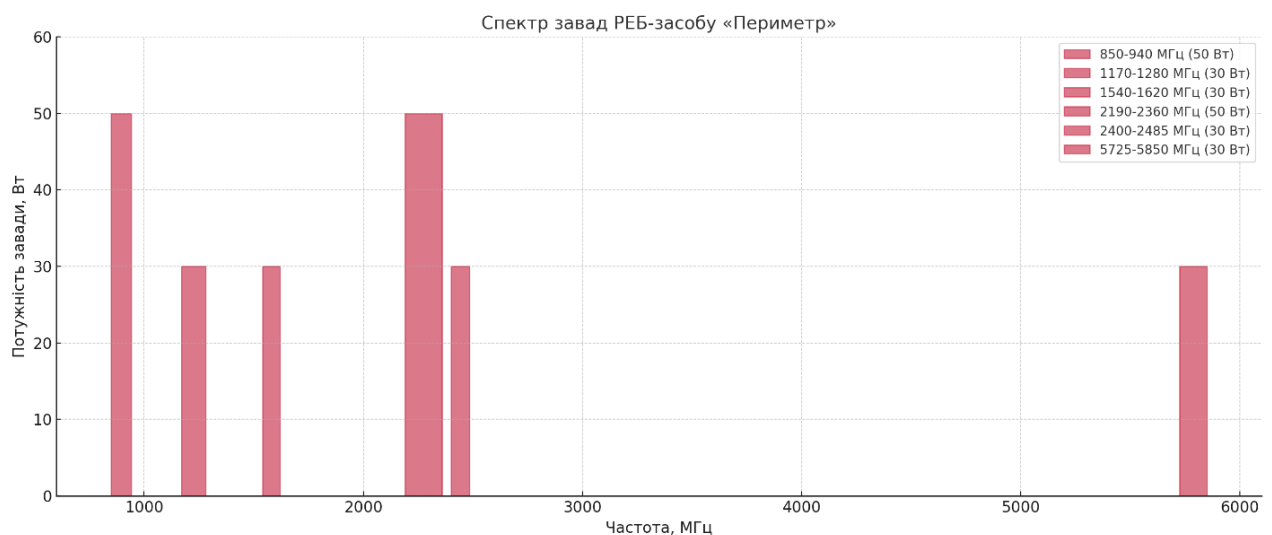


Рисунок 3.2 – Спектр завад від типового «окопного» засобу РЕБ

Кожна смуга на рисунку 3.2 відповідає окремому частотному діапазону глушіння та характеризується певним рівнем випромінюваної потужності.

Заданий спектр завад використовується в межах адаптивного методу як апріорна інформація про можливу завадову обстановку та визначає обмеження на використання окремих каналів. Таким чином, поєднання масиву пріоритетних каналів (рис. 3.1) та спектра завад РЕБ (рис. 3.2) формує початкові умови для роботи алгоритму адаптивного вибору каналу зв'язку.

На рисунку 3.3 наведено суміщене графічне представлення масиву пріоритетів каналів зв'язку (синя лінія) з частотними діапазонами, що перекриваються дією засобу радіоелектронної боротьби «Периметр» (позначені напівпрозорими смугами). Таке представлення дозволяє формалізувати взаємне розташування робочих каналів системи зв'язку та завадових діапазонів у частотній області.

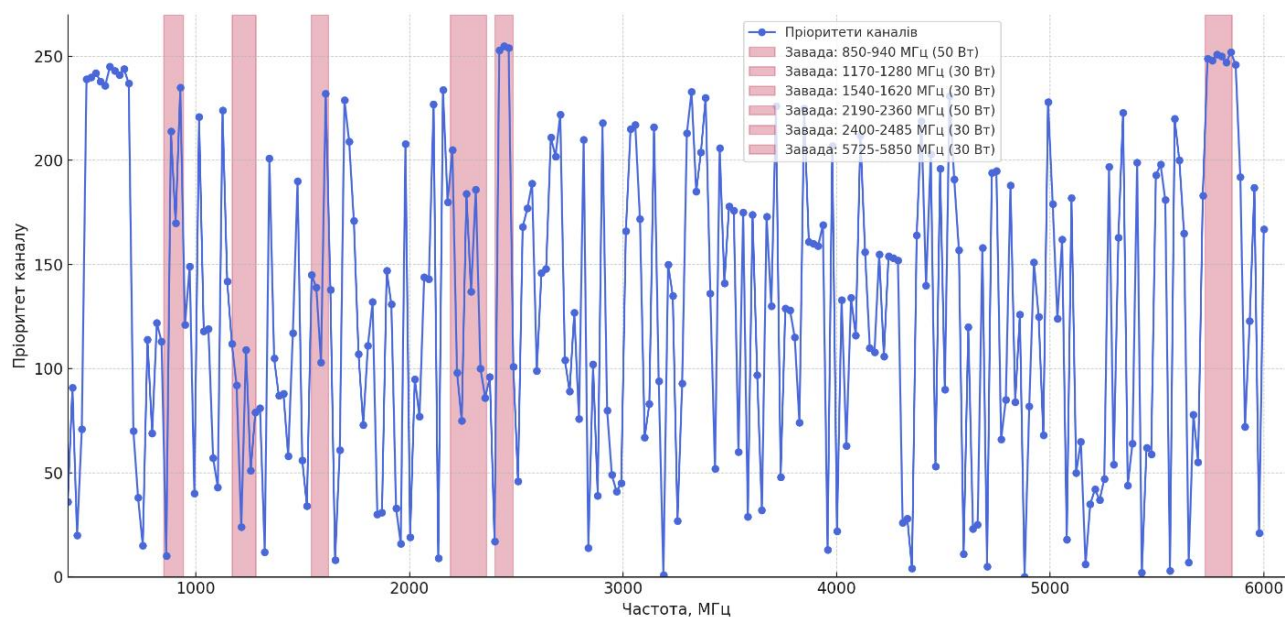


Рисунок 3.3 – Суміщення пріоритетів каналів зв'язку з діапазонами РЕБ-завад

Суміщення пріоритетів каналів із спектром завад використовується в межах розроблюваного адаптивного методу як інформаційна основа для прийняття рішень щодо допустимості використання окремих каналів. Канали, центральні частоти яких потрапляють у зони завадового впливу, можуть бути тимчасово виключені з розгляду або переведені до групи зниженого пріоритету, тоді як канали поза завадовими діапазонами зберігають або підвищують свою вагу при виборі робочої частоти.

Таким чином, наведене суміщене подання не є результатом оптимізації, а слугує ілюстрацією початкових умов та правил, які закладаються в адаптивний алгоритм перемикавання частот. Формування масиву пріоритетів і його коригування з урахуванням спектральних обмежень здійснюється на етапі передексплуатаційного програмування та визначає допустиму область пошуку робочого каналу під час подальшої роботи алгоритму.

3.1.3 Метод моделювання та оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадового впливу

В даній дисертаційній роботі набув подальшого розвитку метод моделювання та оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадового впливу, який, на відміну від існуючих підходів, розширено за рахунок використання сценарного моделювання завад та системи інтегральних і коєвзних метрик стану системи (BER , PER , SNR , Pol), що забезпечує можливість кількісного порівняння ефективності алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних та вибору найбільш ефективної стратегії функціонування системи для заданого сценарію завадового впливу.

Для вирішення поставленої задачі було сплановано загальну модель даних і обчислювальний «каркас», що дає можливість:

- зручно запускати різні сценарії (Eb/No , профіль завадового впливу, зсув частоти, тип затримки);
- уніфіковано збирати метрики (BER , Pol , PER тощо) на різних рівнях: бітовому, повідомлення, кадру та сценарію;
- автоматично отримувати всі необхідні результати імітаційного моделювання, числові та графічні.

Для використання доступні три взаємодоповнювальні шляхи:

- 1) багатовимірний масив для швидких векторизованих розрахунків;
- 2) таблично-часова модель для наочності й зручного експорту даних;

3) «каркас сценаріїв» (структури та класи) для керування параметрами імітаційного моделювання.

В імітаційній моделі використовується «гіперкуб» результатів. «Гіперкуб» у цьому контексті – це спосіб зберігання даних у вигляді багатовимірного масиву (multidimensional array) з більш ніж трьома вимірами.

Позначено:

S – кількість сценаріїв (наборів параметрів каналу та РЕБ);

K – кількість кадрів у сценарії ($K=100$);

M – кількість повідомлень у кадрі ($M=20$);

L – кількість метрик (наприклад: errors, ber, hasErr_msg, hasErr_frame, PER_msg, PER_frame, PoI_msg, PoI_frame).

Для зручності обрано порядок:

$$[\text{метрика} \times \text{повідомлення} \times \text{кадр} \times \text{сценарій}] = [L \times M \times K \times S].$$

При цьому «швидко» змінюється кадр і повідомлення (для векторизації), а сценарій – зовнішній вимір. Мінімальний склад цієї моделі даних:

R – масив розміром $L \times M \times K \times S$ (double/logical).

Meta – структура з довідковими даними: імена метрик, часові осі, параметри сценаріїв.

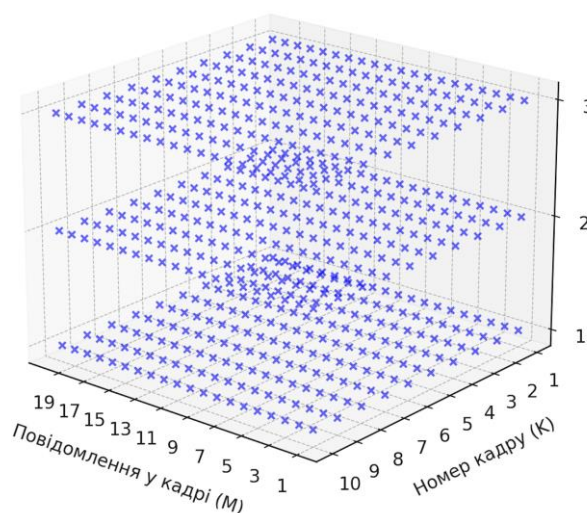


Рисунок 3.4 – Схема зрізу гіперкуба результатів (одна метрика)

На рисунку 3.4 наведено схему зрізу багатовимірного масиву результатів, який формується в процесі комп'ютерного моделювання для однієї обраної метрики. При цьому:

вісь X відповідає номеру повідомлення у кадрі ($m = 1 \dots M$);

вісь Y – номеру кадру ($k = 1 \dots K$);

вісь Z – номеру сценарію ($s = 1 \dots S$).

У реальній моделі для кожної такої точки зберігатимуться значення по всіх метриках (BER , PER , PoI тощо), що утворює повний 4-вимірний масив.

Ініціалізація структури даних у середовищі MATLAB виконана наступним чином:

```
S = numScenarios; K = 100; M = 20;

% словник назв метрик, які зберігатимемо у 1-му вимірі гіперкуба
metrics = {'bitErrors_msg', 'BER_msg', 'msgHasError', ...
           'frameHasError_k', 'PER_msg_k', 'PER_frame_s', ...
           'PoI_msg_k', 'PoI_frame_s'};

L = numel(metrics); % кількість метрик
R = nan(L, M, K, S); % створюємо порожній «гіперкуб»
Meta.metrics = metrics;
Meta.N_frame = 1540; % довжина корисного поля в бітах
Meta.N_msg = Meta.N_frame/M; % довжина окремого повідомлення
% (команди)
Meta.frames = 1:K; % рядковий вектор номерів кадрів
Meta.scen = (1:S)'; % стовпчиковий вектор номерів сценаріїв
```

В схемі заповнення гіперкуба на кожній ітерації s (сценарій) та k (кадр) отримується бітова різниця `diffBits` (вектор довжиною 1540 біт). Далі `diffBits` розбивається на 20 повідомлень і по кожному повідомленню m підраховуються:

```
bitErrors_msg = sum(diffBits(idx_m));
BER_msg = bitErrors_msg/Meta.N_msg;
msgHasError = bitErrors_msg>0.
```

Далі отримуються покадрові показники:

```
frameHasError_k = any(diffBits);
PER_msg_k = mean(msgHasError(:,k));
```

`PER_frame_s` – константа по кадру в поточному сценарії (як частка по K) або ковзне значення – тоді окремий вектор.

Запис результатів у гіперкуб здійснюється за фіксованими індексами вимірів, що забезпечує однозначну адресацію даних та можливість подальшого аналізу:

```
R(1, m, k, s) = bitErrors_msg;
R(2, m, k, s) = BER_msg;
R(3, m, k, s) = msgHasError;
R(4, 1, k, s) = frameHasError_k;
% зберігаємо в першому «m», або дублюємо по всіх m

% Після проходження всіх m по кадру:
R(5, 1, k, s) = mean(R(3, :, k, s));
% PER_msg_k (частка повідомлень з помилкою у кадрі k)

% Ймовірність безпомилкового прийому повідомлення у кадрі k
% PoI_msg_k = 1 - PER_msg_k
R(7, 1, k, s) = 1 - R(5, 1, k, s);
```

Після завершення сценарію s:

```
PER_frame_s = mean( squeeze(R(4, 1, 1:K, s)) ); % частка кадрів із
% помилкою
PoI_frame_s = 1 - PER_frame_s;
R(6, 1, 1:K, s) = PER_frame_s; % або кожен movmean, якщо треба по
% кадрах
R(8, 1, 1:K, s) = PoI_frame_s;
```

Переваги, які при цьому отримуються – максимальна швидкість (MATLAB оптимізований під роботу з цілими векторами й матрицями), компактність коду й простота обробки багатовимірних даних – легко виділяються потрібні зрізи (наприклад, усі кадри певного сценарію, або всі повідомлення у кадрі):

- PoI_{msg} по кадрах: `squeeze(R(7, 1, :, s))`;
- карта помилок «повідомлення×кадр»: `squeeze(R(3, :, :, s))`.

Функція `squeeze()` видаляє зайві виміри (перетворює результат у вектор, а не 3D-масив). Отримується вектор розміром $K \times 1$ – траєкторію PoI повідомлення по кадрах у вибраному сценарії та матриця $M \times K$, тобто 20 повідомлень \times 100 кадрів, яку можна відобразити як теплову карту (*heatmap*). Візуально це дає наочну «матрицю цілісності» – видно, у яких кадрах і для яких повідомлень траплялись збої.

У разі застосування таблично-часової моделі (*timetable*), для зручності аналізу й експорту в CSV, Excel, LaTeX або Word, доцільно паралельно вести дві взаємопов'язані таблиці різних рівнів узагальнення.

1) **Frame-table** ($K \times S$) – це таблиця верхнього рівня, у якій кожен рядок відповідає одному кадру k у межах певного сценарію s . Її структура наведена в таблиці 3.1. Вона агрегує інформацію по всіх повідомленнях кадру та використовується для аналізу часової динаміки якості каналу, оцінювання покадрових показників цілісності даних і впливу параметрів середовища.

До Frame-table включено як інтегральні показники якості передачі (BER_frame , $PER_msg_in_frame$, $PoI_msg_in_frame$), так і параметри каналу, що змінюються у часі (SNR , частотний зсув, затримка). Це дозволяє безпосередньо пов'язати погіршення цілісності інформації з конкретними умовами функціонування каналу у кожному кадрі. Frame-table зручно використовувати для:

- побудови часових графіків BER , PER та PoI ;
- аналізу реакції алгоритмів на зміну рівня завад;
- порівняння різних сценаріїв за інтегральними метриками.

Таблиця 3.1 – Структура таблиці Frame-table

Колонка	Опис
scenarioID	Номер сценарію (1...S).
frameIdx	Номер кадру (1...K).
bitErrors_frame	Кількість бітових помилок у всіх повідомленнях кадру.
BER_frame	Середній BER по кадру.
frameHasError	Індикатор (1 – у кадрі є помилка, 0 – кадр цілісний).
PER_msg_in_frame	Частка повідомлень із помилками у кадрі.
PoI_msg_in_frame	1 – $PER_msg_in_frame$, тобто імовірність цілісності повідомлень у кадрі.
SNRdB	Реальне значення SNR (може змінюватися від кадру до кадру).
FreqOff	Зсув частоти (<i>Frequency Offset</i>), моделює нестабільність генератора або ефект Доплера.
ActualDelay	Затримка сигналу (<i>Delay</i>) у поточному кадрі — зазвичай формується в моделі QPSKChannel.

2) **Message-table** ($K \cdot M \times S$). Це таблиця нижчого рівня деталізації, у якій кожен рядок відповідає окремому повідомленню m у кадрі k в межах сценарію s (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Структура таблиці Message-table

Колонка	Опис
scenarioID	Номер сценарію (1...S).
frameIdx	Номер кадру (1...K).
msgIdx	Номер повідомлення у кадрі (1...M).
bitErrors_msg	Кількість помилок у повідомленні.
BER_msg	$BER \text{ повідомлення} = \text{bitErrors_msg} / N \text{ msg.}$
msgHasError	Індикатор (1 – повідомлення має хоча б одну помилку, 0 – цілісне).

За умов моделювання, прийнятих у даній роботі, при кількості повідомлень $M = 20$ у кадрі та $K = 100$ кадрах у сценарії, розмір таблиці становить 2000 рядків для кожного сценарію. Така структура дозволяє аналізувати цілісність інформації у процесі передачі не лише на рівні кадрів, а й на рівні окремих керуючих повідомлень, що є принципово важливим для систем керування мобільними об'єктами, у яких помилка навіть в одному повідомленні може призводити до некоректного виконання команди. Message-table доцільно використовувати для:

- побудови матриць цілісності повідомлень у вигляді теплових карт (*heatmap*), що відображають розподіл помилок у часовій та логічній структурах кадру;
- фільтрації повідомлень за заданими умовами (наприклад, `msgHasError == 1`);
- обчислення статистичних показників для окремих повідомлень, типів команд або часових інтервалів.

Message-table доповнює Frame-table та забезпечує багаторівневий аналіз результатів моделювання – від локальних збоїв у передачі окремих команд до інтегральних характеристик якості каналу.

Для керування процесом моделювання та забезпечення відтворюваності результатів у роботі використовується верхньорівневий «каркас сценаріїв», реалізований у вигляді масиву структур `Scenario(s)`. Кожен сценарій описує конкретні умови функціонування каналу та містить такі параметри:

```
Scenario(s).EbNoProfile    % профіль Eb/No по кадрах
Scenario(s).FreqOffProfile % профіль частотних зсувів
Scenario(s).DelayProfile   % профіль затримок
```

```
Scenario(s).Seed           % зерно генератора випадкових чисел
Scenario(s).Label          % текстовий опис сценарію
```

Запропонований метод моделювання реалізується через обчислювальний експеримент запуском функції `runScenario(s)`, яка виконує наступні кроки:

1) ініціалізує передавач, канал і приймач відповідно до параметрів сценарію;

2) виконує цикл моделювання по кадрах із фіксацією бітових різниць;

3) повертає багатовимірний масив результатів $R(:, :, :, s)$ та відповідні таблиці `Frame_s` і `Message_s`.

4) оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадого впливу запропонований метод реалізує через функцію `summarizeResults(all)`, яка після виконання всіх сценаріїв формує набір графіків і таблиць для звітної документації, зокрема:

- кількість бітових помилок у кадрах;
- *BER*- та *PER*-криві;
- показники *POI* для кадрів і повідомлень;
- порівняльні результати для різних сценаріїв (рівні *Eb/No*, частотні зсуви, затримки, профілі завадого впливу).

Обґрунтування системи показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі інформації наведено в пп. 3.1.3 даної роботи.

Використання фіксованого значення параметра `Seed` у кожному сценарії забезпечує повну відтворюваність результатів моделювання. Це дозволяє гарантувати, що відмінності між результатами різних сценаріїв зумовлені саме зміною параметрів каналу або алгоритмів обробки, а не випадковими флуктуаціями генератора шуму чи бітових послідовностей.

Короткий «скелет» функції запуску виглядає наступним чином:

```
function [R, FrameTbl, MsgTbl, Meta] = runScenario(Scenario, prm)
    % prm — константи моделі: K, M, N_frame, Fs, in.
    [R, Meta] = initResultCube(prm, Scenario);    % А-частина
    FrameRows = []; MsgRows = [];               % В-частина (таблиці)

    for k = 1:prm.K
        % 1) згенерувати кадр та параметри каналу на кадр k
        % 2) прогнати через Tx→Channel→Rx
```

```

        % 3) diffBits: logical N_frame×1
        % ---- наповнюємо R (гіперкуб) і одночасно таблиці
    end

    FrameTbl = struct2table(FrameRows); % або table з попередньою
% ініціалізацією
    MsgTbl = struct2table(MsgRows);
End

```

Приклад одного з можливих сценаріїв для розроблюваної моделі, у якому задані всі основні параметри каналу, щоб його можна було прогнати через функцію `runScenario` і отримати в масиві або таблиці потрібні метрики:

```

% Приклад одного сценарію (s = 1)
Scenario(1).Label = ...
'Baseline, Eb/No=12dB, трикутна затримка, постійний зсув 5kHz';

% Профіль Eb/No по кадрах (100 кадрів, константа)
Scenario(1).EbNoProfile = 12 * ones(1,100); % dB

% Профіль частотного зсуву (Hz) – постійний зсув 5 кГц
Scenario(1).FreqOffProfile = 5000 * ones(1,100);

% Профіль змінн. затримки (симул. багатопромен., triangle pattern)
% макс. значення затримки (відповідає параметрам QPSKChannel)
delayMax = 8;
delayStep = 0.05; % крок
Scenario(1).DelayProfile = zeros(1,100);
for k = 1:100
    idx = mod(k-1, 2*delayMax/delayStep);
    if idx <= delayMax/delayStep
        Scenario(1).DelayProfile(k) = idx * delayStep;
    else
        Scenario(1).DelayProfile(k) = 2*delayMax - idx * ...
delayStep;
    end
end

% Тип затримки ('Triangle' або 'Ramp')
Scenario(1).DelayType = 'Triangle';

% Seed генератора випадкових чисел для відтворюваності
Scenario(1).Seed = 12345;

% Інші параметри сценарію (для зручності зберігаємо)
Scenario(1).Comment = ...
'Базова конфігурація для перевірки роботи всієї моделі без РЕБ';

```

Тут задані наступні параметри:

Label – коротка назва для легенд графіків;

`EbNoProfile` – вектор довжиною 100 кадрів; є можливість задати його постійним або змінним (завадовий вплив);

`FreqOffProfile` – вектор частотних зсувів по кадрах (у Гц);

`DelayProfile` – затримка по кадрах, розрахована за законом «трикутник» (імітація змін багатопроменевого каналу);

`DelayType` – тип затримки у каналі;

`Seed` – фіксоване зерно генератора для відтворюваних результатів;

`Comment` – текстовий опис для звітної документації.

Для більш складних сценаріїв є можливість:

- зробити `EbNoProfile` таким, що змінюється по кадрах (наприклад, зменшується на 3 дБ через кожні 20 кадрів – імітація входження в зону дії засобу пригнічення);
- зробити `FreqOffProfile` із різким стрибком, що імітує додатковий зсув частоти;
- змінювати `DelayProfile` у довільному вигляді, наприклад, з фазовими збуреннями.

3.1.4 Обґрунтування системи показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі інформації

Нижче наведено набір із восьми метрик, які доцільно зберігати у багатовимірному масиві результатів R з індексацією [метрика×повідомлення×кадр×сценарій]. Така ієрархія безпосередньо відображає процеси формування та втрати цілісності інформації в каналі керування і є методично обґрунтованою для аналізу адаптивних алгоритмів у нестационарних умовах (рис. 3.5).

Базовою «атомарною» величиною в даній моделі є *вектор бітових розбіжностей* між переданими та відновленими бітами корисного навантаження кадру. Передавач формує вектор бітів

$$txBits \in \{0,1\}^N,$$

де $N = 1540$ – кількість бітів корисного поля кадру (20 повідомлень по 77 біт кожне).

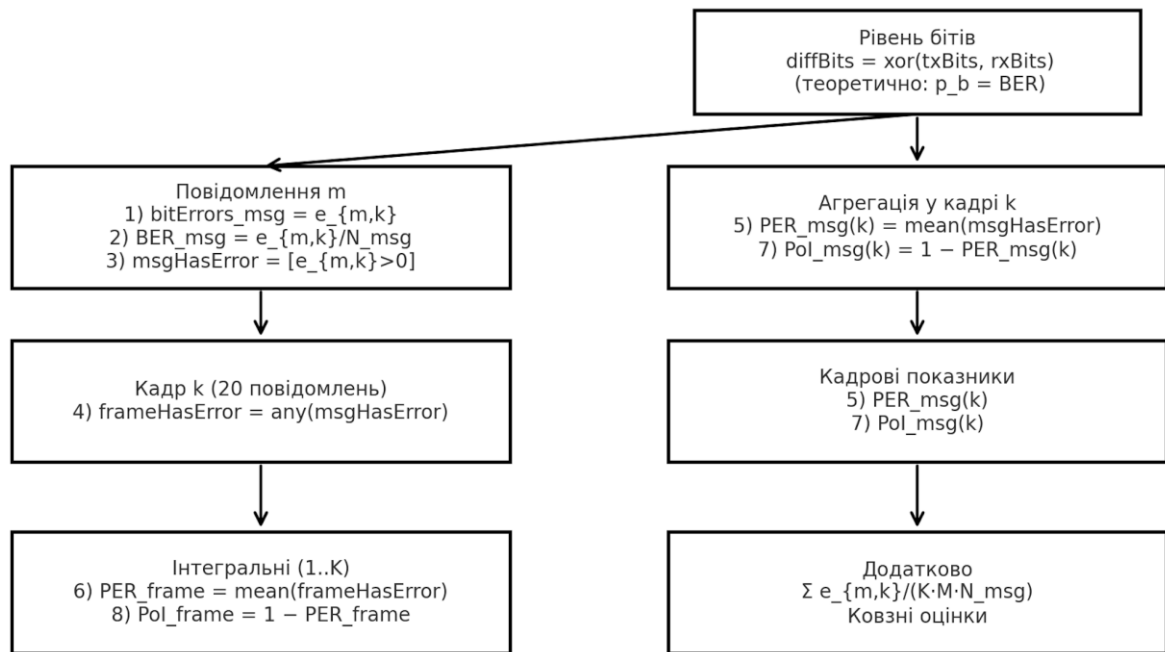


Рисунок 3.5 – Ієрархія метрик цілісності «біт → повідомлення → кадр → сценарій»

Приймач, після виконання часової та частотної синхронізації, демодуляції та (за потреби) декодування, формує відповідний вектор $rxBits$. Ключовою умовою коректності подальших обчислень є бітова вирівняність цих векторів за довжиною та порядком бітів. За цієї умови вектор бітових помилок визначається як

$$diffBits = txBits \oplus rxBits,$$

де кожен елемент $diffBits(i)=1$ відповідає помилковому біту, а $diffBits(i)=0$ – коректному. Саме цей бінарний вектор є основою для обчислення всіх подальших метрик цілісності даних. Теоретичний параметр p_b у підписі блоку – це ймовірність бітової помилки (*post-FEC BER*) у статистичному сенсі; у симуляції не підставлятимемо p_b напряду, а емпірично оцінюватимемо його з $diffBits$:

$$\widehat{BER}_{frame} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N diffBits(i).$$

Верхній блок фіксує принцип: усе зводиться до XOR двох узгоджених бітових масивів; p_b – це теоретичний аналог середнього значення цієї бінарної випадкової величини.

Масив різниць між переданими та прийнятими бітами потім розбиватиметься на кількість повідомлень у кадрі, щоб обчислювати значення наступних метрик. На рівні повідомлення зберігаються три первинні величини. Кількість бітових помилок у m -му повідомленні k -го кадру визначається сумою індикаторів розбіжностей між еталонним та відтвореним бітами:

$$e_{m,k} = \sum_{i \in msg\ m} 1\{b_i^{(tx,k)} \oplus b_i^{(rx,k)} = 1\},$$

нормування на довжину повідомлення дає локальний BER повідомлення:

$$BER_{m,k} = \frac{e_{m,k}}{N_{msg}},$$

а також індикатор помилки повідомлення – бінарний маркер наявності хоча б однієї бітової помилки:

$$I_{m,k}^{msg} = 1\{e_{m,k} > 0\}.$$

Саме ці три показники забезпечують можливість побудови теплових карт «повідомлення \times кадр» й прямих розрахунків PoI та PER для команд керування.

На рівні кадру фіксується індикатор помилки кадру:

$$I_k^{frame} = 1\left\{\sum_{m=1}^M e_{m,k} > 0\right\},$$

та частка «помилкових» повідомлень у кадрі:

$$PER_{msg,k}^{in-frame} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M I_{m,k}^{msg},$$

що є покадровим оцінюванням PER_{msg} і базою для PoI повідомлень у кадрі:

$$PoI_{msg,k}^{in-frame} = 1 - PER_{msg,k}^{in-frame}.$$

Це дозволяє відокремлювати ситуації типу «одиночні збої команд» від «катастрофічних кадрів». Але у випадку оцінювання бітових помилок на рівні одного кадру (наприклад, у 16-му кадрі зафіксовано 27 помилок із 1540 біт), отримується *миттєвий* показник, досить «шумоподібний»: у наступному кадрі може бути нуль помилок, у ще наступному – знову 36, і так далі. У висновках, зроблених лише на основі цих миттєвих коливань, картина виглядає нестабільною й не відображає середні властивості каналу. Тому доцільно обчислювати інтегральні, «накопичені» по кадрах метрики, що потрібні для підсумкових таблиць і порівняння сценаріїв. Формула BER , накопиченого від початку симуляції й до поточного кадру k , виглядає так:

$$\widehat{BER}_{1:k} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M e_{m,j}}{kMN_{msg}},$$

тобто оцінюється не лише один кадр, а усереднюється інформація по всіх кадрах від початку. Після кількох десятків кадрів оцінка *інтегрального* BER стабілізується і стає «глобальною характеристикою каналу» при даному сценарії.

Аналогічно, для показника PER кадру (ймовірності, що кадр містить хоча б одну помилку) не просто оцінюється, чи поточний кадр був зіпсований, а підраховується:

$$\widehat{PER}_{1:k}^{frame} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k I_j^{frame},$$

дана величина показує яка частка кадрів з початку передачі була зіпсована. Чим довше триватиме експеримент, тим точніше це значення відображатиме властивості сценарію. Звідси отримується *ймовірність цілісності кадру*, яка є доповненням до одиниці для *ймовірності помилки кадру*, це «оцінена» *ймовірність* за скінченною вибіркою перших k кадрів:

$$\widehat{POI}_{1:k}^{frame} = 1 - \widehat{PER}_{1:k}^{frame}.$$

Тут слід зазначити, що істинна, а не оцінена, ймовірність цілісності кадру, якщо припустити незалежні бітові рішення з ймовірністю помилки p_b , дорівнює:

$$POI^{frame} = (1 - p_b)^N,$$

де N – кількість бітів у полі корисного навантаження кадру [100]. Для малих p_b маємо наближення:

$$POI^{frame} \approx 1 - Np_b,$$

звідки

$$PER^{frame} \approx Np_b.$$

Для вирішення даної практичної задачі, працюватимемо із оціночними значеннями ймовірностей помилки та цілісності кадру, що збігаються до істинних значень із ростом k .

Доцільно також при аналізі результатів моделювання використовувати ковзні середні показники, як компроміс між «шумними» покадровими показниками й інтегральними показниками, які мають недостатню «локальну» чутливість:

$$\widetilde{BER}_k = \frac{1}{W} \sum_{j=k-W+1}^k \frac{e_j}{N_{frame}},$$

де W – вікно усереднення (наприклад 10 кадрів), це дозволяє бачити тенденції локальних змін показників, але без надмірних стрибків. На графіку (рис. 3.6) показана різниця між інтегральним BER та ковзним середнім BER на серії з 100 кадрів.

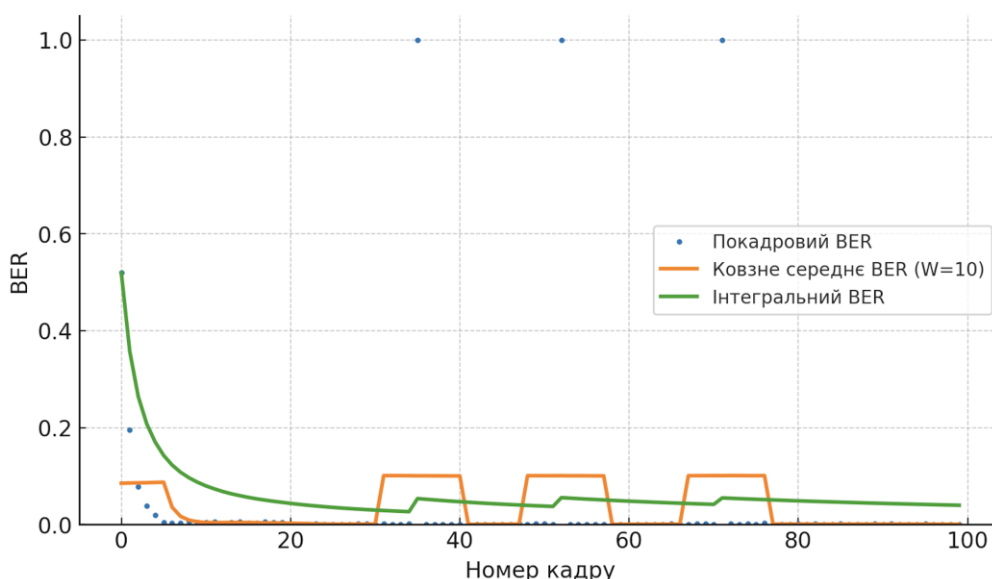


Рисунок 3.6 – Порівняння показового, ковзного та інтегрального *BER*

На графіку видно три рівні оцінювання якості каналу зв'язку:

1) показовий *BER* (крапки) – «миттєвий» стан каналу: різкі стрибки в перших кадрах і поодинокі «катастрофічні» кадри дають значення до 1 (повна втрата кадру);

2) ковзне середнє *BER* (помаранчева крива) – локально згладжує шум на відрізках довжиною $W=10$ кадрів, тому на «викидах» видно помітні плато, але без надмірних пилкоподібних коливань;

3) інтегральний *BER* (зелена крива) – середній від початку експерименту до поточного кадру. Швидко спадає у перші кадри (коли система входить у синхронізм), а далі зменшується повільно, демонструючи глобальну якість сценарію з урахуванням усіх спостережень.

Запропонована система метрик цілісності та якості передачі інформації дозволяє формалізувати стан радіоканалу керування БпЛА на різних часових і структурних рівнях – від окремого повідомлення до сценарію в цілому. Отримані показники (*BER*, *PER*, *PoI*, *SNR*, затримка) не є самоціллю, а виступають інформаційною основою для прийняття рішень щодо подальшого функціонування каналу в умовах динамічного завадового впливу.

Наступним логічним кроком є розроблення удосконаленого модельно-алгоритмічного підходу до адаптивного керування параметрами каналу передачі

даних, який використовує зазначені метрики для своєчасного виявлення деградації каналу, ідентифікації впливу завад та ініціювання адаптивних дій – зокрема, блокування проблемних частот і перемикання на альтернативні канали зв'язку. Такий підхід повинен враховувати як характеристики каналу, так і апаратні обмеження SDR-платформи, а також часові вимоги системи керування цільовим об'єктом.

3.2 Удосконалений модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних

Удосконалений модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних ґрунтується на інтеграції розробленої імітаційної моделі каналу, моделі завадового середовища та алгоритмів прийняття рішень у єдину обчислювальну структуру. Такий підхід передбачає формалізоване представлення процесу передачі даних як динамічного інформаційного процесу, стан якого змінюється під впливом як внутрішніх параметрів системи, так і зовнішніх дестабілізуючих факторів. На відміну від традиційних підходів, що базуються на аналізі лише миттєвих енергетичних характеристик каналу, запропонований підхід забезпечує багатокритеріальне оцінювання його стану з урахуванням показників цілісності даних, часової динаміки функціонування та накопиченої інформації про попередні стани каналу.

Ключовою особливістю підходу є використання сценарного представлення завадового середовища, що дозволяє формалізувати різні режими навмисного впливу, зокрема фіксованосмугове пригнічення, реактивні завади та повторне ураження раніше використаних частот. У межах кожного сценарію визначається відповідна динаміка зміни параметрів каналу, що відображається у часових залежностях показників якості передачі, передусім бітової помилки. Це забезпечує можливість дослідження поведінки системи в умовах, максимально наближених до реальних, та формування обґрунтованих стратегій адаптивного керування.

Алгоритмічна складова підходу реалізує цикл адаптації, що включає моніторинг стану каналу, оцінювання його якості, виявлення моментів деградації та прийняття рішень щодо зміни параметрів передачі. При цьому оцінювання стану каналу здійснюється на основі системи показників цілісності даних, серед яких ключову роль відіграють інтегральний та ковзний *BER*. Інтегральний *BER* використовується для узагальненої оцінки ефективності функціонування системи протягом усього сеансу зв'язку, тоді як ковзний *BER* забезпечує оперативне виявлення короточасних погіршень якості каналу та формує критерій спрацювання алгоритму керування з мінімальною затримкою.

Прийняття рішень щодо вибору робочого каналу або зміни параметрів передачі здійснюється з урахуванням множини допустимих каналів, їх пріоритетів, поточного стану каналу та інформації про попередні невдалі спроби використання певних частот. Для запобігання повторному вибору непридатних каналів використовується механізм їх тимчасового блокування, що враховує часові характеристики завадового впливу. Такий підхід дозволяє враховувати не лише поточний стан середовища, але й його еволюцію, що підвищує обґрунтованість адаптивних рішень.

Застосування запропонованого модельно-алгоритмічного підходу забезпечує узгодження процесів моделювання, оцінювання та керування в межах єдиної формалізованої структури, що дозволяє реалізувати ефективне адаптивне керування параметрами каналу передачі даних. У результаті досягається зменшення рівня бітових помилок, своєчасне реагування на деградацію каналу та забезпечення збереження цілісності переданої інформації в умовах нестаціонарного завадового середовища.

3.2.1 Алгоритм реагування на завади у діючому каналі керування

Алгоритм реагування на завади у діючому каналі керування цільової системи розробляється як алгоритмічне продовження системи метрик, описаної в підрозділі 3.1, і призначений для прийняття рішень у реальному або квазіреальному часі на основі поточного стану каналу передачі даних.

Вихідним припущенням є наявність попередньо сформованої сітки каналів, яка задається на етапі передексплуатаційного програмування і включає:

- центральні частоти каналів;
- ширину смуги пропускання;
- тип модуляції та базові параметри передачі;
- пріоритети використання каналів;
- допустимі порогові значення показників якості.

У процесі роботи цільової системи алгоритм не змінює структуру цієї сітки, а здійснює динамічний вибір і керування її елементами залежно від поточного стану каналу та виявлених завадових впливів.

Алгоритм функціонує у вигляді замкненого циклу, що включає такі основні етапи:

1) *Моніторинг діючого каналу.* Для активного каналу в кожному кадрі або контрольному інтервалі оцінюються показники якості передачі: співвідношення сигнал/шум, бітова та кадрова помилка, затримка та інші похідні метрики, сформовані у підсистемі приймача;

2) *Порівняння з пороговими значеннями.* Отримані значення метрик порівнюються з допустимими межами, заданими у конфігураційній структурі алгоритму. Вихід за межі хоча б одного з порогів інтерпретується як ознака деградації каналу;

3) *Ідентифікація завадового впливу.* У разі фіксації деградації ініціюється аналіз завадової обстановки, який може включати оцінювання спектральної зайнятості, рівня шуму та характеру спотворень сигналу з метою відрізнєння випадкових флуктуацій від навмисних завад;

4) *Прийняття рішення щодо подальших дій.* За результатами аналізу алгоритм визначає доцільність:

- збереження роботи на поточному каналі;
- тимчасового блокування каналу;
- ініціювання процедури вибору альтернативного каналу.

Таким чином, алгоритм реагування не виконує оптимізацію у строгому математичному сенсі, а реалізує правило-орієнтований механізм адаптивного керування, який спирається на формалізовані метрики стану каналу та обмеження реальної системи зв'язку цільового об'єкта. Подальші підпункти розділу 3 присвячені деталізації окремих процедур цього алгоритму, зокрема виключенню діючого каналу з зондування, блокуванню зашумлених частот і вибору нового робочого каналу.

3.2.2 Процедура виключення діючого каналу із зондування

У запропонованому методі адаптивного керування параметрами каналу передачі даних зондування радіочастотного спектра використовується для формування множини альтернативних частот та оцінювання їх придатності для перемикання в умовах навмисних завад. Діючий канал, на якому в поточний момент здійснюється передача керуючої інформації, розглядається як окремий об'єкт безперервного моніторингу, стан якого оцінюється за показниками якості та цілісності даних (*BER*, *PER*, *PoI*, *SNR*, затримка тощо).

З огляду на це активний канал виключається з процедури спектрального зондування та не входить до множини альтернативних частот. Такий підхід забезпечує алгоритмічне розмежування двох процесів: контролю якості поточного каналу та пошуку резервних частот для можливого перемикання.

Виключення активного каналу має алгоритмічний, а не апаратний характер. Зокрема, у разі використання програмно-визначеного радіо USRP B210, яке підтримує повнодуплексний режим роботи, технічно можливе одночасне передавання керуючих повідомлень і приймання сигналів для аналізу спектра. Однак у межах розробленого методу зондування активної частоти вважається недоцільним з огляду на особливості інтерпретації вимірювань і логіку прийняття рішень.

По-перше, на діючому каналі постійно присутній корисний сигнал системи керування, що унеможливорює коректне відокремлення енергетичного внеску зовнішніх завад від власного випромінювання під час спектрального аналізу. По-друге, контроль стану активного каналу здійснюється через аналіз показників

цілісності даних у процесі передачі (бітових і кадрових помилок, підтвердження доставки повідомлень), що є більш релевантним критерієм деградації зв'язку. По-третє, зосередження процедур зондування виключно на альтернативних частотах дозволяє ефективніше використовувати ресурси аналізу та завчасно формувати впорядковану множину кандидатів для перемикавання.

Таким чином, у межах адаптивного алгоритму активний канал підлягає безперервному метричному контролю, тоді як спектральне зондування спрямоване виключно на оцінювання резервних частот, що підвищує визначеність алгоритму та стійкість прийняття рішень в умовах навмисних завад.

У формалізованому вигляді на кожному циклі зондування формується множина допустимих каналів Ω_k , яка визначається початковою сіткою частот з урахуванням пріоритетів та спектральних обмежень. Діючий канал з індексом ch_{active} виключається з цієї множини відповідно до виразу:

$$\Omega_k \leftarrow \Omega_k \setminus \{ch_{active}\}.$$

Подальший аналіз спектра та оцінювання параметрів завад виконуються лише для каналів з множини Ω_k , тоді як рішення щодо збереження або зміни активного каналу приймається незалежно – на основі показників цілісності та стабільності передачі даних.

Таким чином, процедура виключення діючого каналу із зондування підвищує стійкість адаптивного алгоритму, усуває неоднозначність інтерпретації спектральних оцінок і створює передумови для своєчасного реагування на зміну завадової обстановки, незалежно від апаратних можливостей SDR-платформи, зокрема підтримки повнодуплексного режиму роботи.

3.3 Фонові умови функціонування каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів

Функціонування каналу передачі даних у системах дистанційного керування в умовах навмисних дестабілізуючих впливів відбувається у

складному динамічному середовищі, яке визначається сукупністю часових, спектральних та обчислювальних обмежень. На відміну від стаціонарних або квазістаціонарних умов, характерних для типових інформаційно-комунікаційних систем, у даному випадку параметри каналу змінюються нерівномірно та можуть зазнавати стрибкоподібних змін під впливом зовнішніх факторів.

Дестабілізуючі впливи проявляються у вигляді змін параметрів інформаційного середовища, що призводить до погіршення характеристик передачі даних, зокрема до зниження відношення сигнал/шум, збільшення затримок і зростання ймовірності помилок. При цьому вплив не є миттєвим і однорідним, а характеризується певною часовою інерційністю, що зумовлена процесами виявлення активності каналу, аналізу середовища та обмеженнями швидкодії систем, які реалізують дестабілізуючий вплив. У результаті в каналі передачі даних спостерігається чергування інтервалів відносно стабільного функціонування та інтервалів деградації якості передачі.

Суттєвою особливістю таких умов є наявність кількох часових масштабів функціонування системи. Процеси передачі даних визначаються дискретною структурою кадрів і повідомлень, тоді як зміни параметрів середовища мають іншу часову динаміку, пов'язану з реакцією зовнішніх впливів і змінами стану каналу. Це призводить до ситуацій, коли оцінка якості передачі повинна враховувати не лише миттєві значення показників, а й їх часову еволюцію.

У таких умовах окремі канали або режими передачі можуть тимчасово втрачати ефективність не через повну відмову, а внаслідок погіршення показників якості до рівня, неприйнятного для забезпечення цілісності даних. При цьому характер деградації залежить від параметрів передачі, використаних раніше режимів роботи та поточного стану середовища, що формує залежність якості функціонування від історії станів каналу.

З огляду на це, канал передачі даних доцільно розглядати як динамічне середовище з пам'яттю, у якому поточний стан визначається як миттєвими параметрами, так і попередніми умовами функціонування. Такий підхід дозволяє абстрагуватися від детального опису механізмів формування дестабілізуючих

впливів і водночас зберегти можливість формалізованого опису їх впливу на інформаційні процеси.

У межах розроблюваного методу дестабілізуючі впливи подаються у вигляді параметризованих сценаріїв, що описують часову змінність ключових характеристик каналу, зокрема рівня шуму, частотних відхилень і затримок. Такі сценарії використовуються як вхідні дані для алгоритмів адаптивного керування та дозволяють моделювати різні режими функціонування каналу передачі даних без прив'язки до конкретних технічних реалізацій.

Наведений опис визначає фонові умови функціонування каналу передачі даних як динамічного об'єкта комп'ютерного моделювання та задає обмеження, які повинні враховуватися при розробленні адаптивних алгоритмів керування параметрами передачі даних. Формалізація цих умов створює основу для подальшого синтезу алгоритмічних механізмів реагування на зміну стану середовища, що розглядаються в наступних підрозділах.

3.3.1 Модель взаємодії каналу передачі даних та дестабілізуючого середовища

У подальшому розгляді канал передачі даних аналізується як елемент динамічного інформаційного середовища, параметри якого змінюються під впливом двох незалежних керуючих контурів. Перший контур відповідає за адаптивне керування параметрами передачі даних і реалізується в обчислювальній системі БпЛА (ОС БпЛА). Другий контур формує дестабілізуючий вплив на канал і розглядається як зовнішнє середовище з власною динамікою. Зазначені контури не є координованими між собою та функціонують відповідно до незалежних алгоритмічних стратегій.

Взаємодія між каналом передачі даних і дестабілізуючим середовищем у даній роботі не формалізується як задача оптимізації або теоретико-ігрова модель. Натомість вона розглядається як узагальнене представлення середовища функціонування, у якому адаптивний алгоритм керування повинен приймати рішення за умов невизначеності, обмеженої спостережуваності та наявності часових затримок. Такий підхід дозволяє зосередити увагу на алгоритмах

оброблення даних і механізмах адаптації без необхідності моделювання внутрішньої логіки джерела дестабілізуючого впливу.

Взаємодію системи формалізовано у вигляді узагальненої структурно-графової моделі (рис. 3.7), яка відображає інформаційні потоки, керуючі впливи та часові залежності між основними компонентами. Центральним елементом моделі є стан каналу передачі даних $s(t)$, що в кожний момент часу належить множині допустимих станів S і описується сукупністю параметрів, які визначають умови та якість передачі даних.

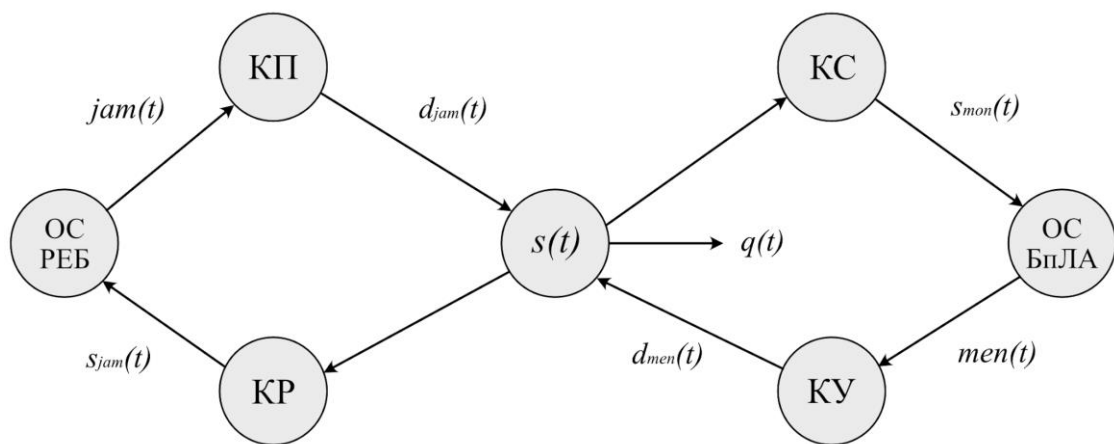


Рисунок 3.7 – Модель взаємодії між каналом передачі даних і дестабілізуючим середовищем

Для кількісного опису функціонування каналу вводиться інтегральний показник ефективності $q(t)$, який узагальнює вплив енергетичних, часових і завадових факторів. Конкретна інтерпретація та методика обчислення цього показника ґрунтуються на системі метрик цілісності даних, розглянутих у попередніх підрозділах.

Обчислювальна система цільового об'єкта (ОС БпЛА) генерує керуючі впливи $men(t)$ на підставі інформації, що надходить із каналу спостереження (КС). Через КС формується вектор спостережуваних параметрів $s_{mon}(t)$, який відображає поточний стан каналу передачі даних та може містити оцінки рівня завад, значення показників помилок передачі, результати спектрального зондування та інші діагностичні характеристики. На основі цих даних приймається рішення щодо зміни параметрів функціонування каналу.

Сформовані керуючі дії передаються через канал управління (КУ), де з урахуванням внутрішніх перетворень і часових затримок реалізуються у вигляді фактичної зміни параметрів каналу передачі даних $d_{men}(t)$.

Завадове середовище, у свою чергу, формується засобами пригнічення (РЕБ), які здійснюють моніторинг середовища через канал розвідки (КР). Отримані спостереження $s_{jam}(t)$ використовуються для синтезу завадового сигналу $jam(t)$, який через канал пригнічення (КП) після відповідних затримок трансформується у реальний дестабілізуючий вплив $d_{jam}(t)$ на канал передачі даних. У межах запропонованої моделі параметри цього впливу задаються у вигляді сценаріїв і розглядаються як некеровані збурення відносно адаптивного алгоритму.

Обидва контури функціонують за наявності обмежень, зумовлених технічними, часовими та інформаційними факторами. Для адаптивної системи це обмеження на допустимі параметри передачі, швидкодію алгоритмів оброблення та доступність інформації про стан каналу. Для дестабілізуючого середовища – це обмеження на інтенсивність, спектральні характеристики та швидкість зміни параметрів впливу. Сукупність цих факторів формує динамічне середовище, у якому стан каналу змінюється з різною швидкістю та за різними законами.

Таким чином, запропонована на рис. 3.7 модель дозволяє формалізувати взаємозв'язок між станом каналу передачі даних, спостережуваними параметрами, керуючими впливами та показниками якості передачі даних. Вона створює теоретичну основу для розроблення адаптивних алгоритмів керування, орієнтованих на забезпечення цілісності даних в умовах невизначеного та динамічного середовища, що розглядається у наступних підрозділах.

3.3.2 Функціональна модель взаємодії каналу передачі даних та дестабілізуючого середовища

Для формалізації умов функціонування каналу передачі даних у динамічному середовищі з навмисними дестабілізуючими впливами розроблено

який змінюється в часі під впливом як корисного інформаційного потоку, так і зовнішніх збурень. Для оцінювання ефективності функціонування каналу вводиться інтегральний показник $q(t)$, який формується на основі метрик цілісності даних та відображає якість передачі інформації у часовому вимірі.

У схемі враховано просторово-часові фактори поширення сигналів. Відстані між джерелом керування (ПО), цільовою системою (БпЛА) та засобом дестабілізуючого впливу (РЕБ) позначені як $L_{ПБ}$, $L_{ПР}$, $L_{БР}$, а відповідні часові затримки розповсюдження сигналів – як $t_{рПБ}$, $t_{рПР}$, $t_{рБР}$. Наявність цих затримок є принциповою для аналізу динаміки завадової обстановки, оскільки вони зумовлюють асинхронність спостережень і керуючих впливів у різних підсистемах.

Контур адаптивного керування реалізується через канал спостереження, який забезпечує формування вектора спостережуваних параметрів на основі аналізу прийнятого сигналу. Отримана інформація використовується для оцінювання стану каналу передачі даних та формування керуючих рішень щодо зміни параметрів передачі даних. Реалізація цих рішень здійснюється через канал управління з урахуванням затримок оброблення та виконання, що визначає інерційність адаптивного процесу.

З боку завадового середовища засіб формування зовнішнього впливу здійснює спостереження за середовищем через канал розвідки (КР) і формує завадові сигнали, які подаються у канал пригнічення (КП). У межах даної моделі параметри завадового впливу задаються сценарно та розглядаються як зовнішні по відношенню до адаптивного алгоритму, що реалізується на боці цільової системи.

Функціональна схема також відображає відмінність між зовнішніми інформаційними потоками, для яких затримки поширення є суттєвими (потовщені лінії), та внутрішніми обчислювальними процесами, затримки яких є відносно малими. Це дозволяє коректно враховувати вплив часових факторів на стабільність та ефективність адаптивного керування.

Таблиця 3.3 – Позначення часових параметрів, використаних на рисунку 3.9

Позначення	Характеристика параметра
$t_{пак}$	Час передавання пакета керування
$t_{фАСК}$	Час формування підтвердження (АСК) в БпЛА
$t_{АСК}$	Час передавання підтвердження (АСК)
$t_{ан}$	Час аналізу прийнятого сигналу засобом РЕБ
$t_{пр}$	Час прийняття рішення щодо вибору режиму пригнічення РКК засобом РЕБ
$t_{прБ}$	Час прийняття рішення щодо вибору режиму функціонування РКК обчислювальною системою БпЛА
$t_{фс}$	Час формування сигналу засобом РЕБ
$t_{вклПП}$	Час перемикання режиму функціонування підсилювача потужності засобу РЕБ (включно з увімкненням)
$t_{прнПО}$	Час переналаштування пункту управління на інші параметри РКК
$t_{РЕБ}$	Тривалість впливу сформованої завади
$t_{зРЕБ}$	Тривалість перекриття пакета, що приймається, та сформованої завади

Наведені в таблиці 3.3 позначення використовуються для формалізації часової структури взаємодії каналу керування БпЛА та засобів завадового впливу в імітаційній моделі.

Таблиця 3.4 – Часові затримки циклів управління в імітаційній моделі протидії засобам РЕБ

Позначення	Аналітичний вираз	Характеристика затримки
$t_{КР}$	$t_{рПР} + t_{ан}$	Час затримки в каналі розвідки
$t_{СПР РЕБ}$	$t_{пр} + t_{фс}$	Час затримки в системі прийняття рішень засобу РЕБ
$t_{КП}$	$t_{вклПП} + t_{рРБ}$	Час затримки в каналі пригнічення
$t_{КС}$	$t_{рПБ} + t_{пак}$	Час затримки в каналі спостереження
$t_{СПР БпЛА}$	$t_{прБ}$	Час затримки в системі прийняття рішень БпЛА
$t_{КУ}$	$t_{фАСК} + 2t_{АСК} + t_{рПБ} + t_{прнПО}$	Час затримки в каналі управління

Позначення складових часових параметрів (табл. 3.4) відповідають прийнятим у моделі функціональним етапам обробки, передачі та прийняття сигналів і використовуються для формалізації часової динаміки взаємодії системи керування БпЛА та засобів завадового впливу.

Час циклу управління засобу РЕБ складає:

$$t_{РЕБ} = t_{КР} + t_{СПР РЕБ} + t_{КП} = t_{рПР} + t_{ан} + t_{пр} + t_{фс} + t_{вклПП} + t_{рРБ}.$$

Час циклу управління БпЛА складає:

$$t_{БпЛА} = t_{КС} + t_{СПР БпЛА} + t_{КУ} = t_{рПБ} + t_{пак} + t_{прБ} + t_{фАСК} + 2t_{АСК} + t_{рПБ} + t_{прнПО}.$$

Наведені співвідношення показують, що процеси зміни стану радіоканалу, його спостереження та формування керуючих рішень відбуваються з різними характерними часовими затримками. Унаслідок цього стан радіоканалу $s(t)$ у кожний момент часу відображає результат сукупної дії попередніх керуючих і завадових впливів, а не миттєвий стан середовища. Така асинхронність є об'єктивною властивістю системи зв'язку в умовах завадового впливу та не може бути усунута за рахунок удосконалення окремих підсистем.

У цьому контексті часова модель, представлена на рис. 3.9, використовується для формалізації зовнішніх часових обмежень, у межах яких має функціонувати адаптивний алгоритм обробки параметрів каналу. Вона дозволяє встановити допустимі інтервали прийняття рішень, обґрунтувати необхідність використання накопичувальних і інтегральних метрик якості та визначити вимоги до алгоритму реагування щодо стійкості до затримок і нестационарності завадової обстановки. Саме з урахуванням цих обмежень у наступному підрозділі розглядається алгоритм адаптивного реагування системи керування БПЛА на зміну параметрів радіоканалу.

3.3.4 Створення імітаційної моделі засобу РЕБ противника

Для побудови імітаційної моделі засобу радіоелектронної боротьби противника розглянемо типову просторову конфігурацію, характерну для умов застосування безпроводних систем керування БПЛА поблизу лінії зіткнення. Вважатимемо, що оператор БПЛА розташований на відстані 10 км від лінії зіткнення, БПЛА здійснює політ безпосередньо в зоні виконання завдання, а засіб РЕБ противника розміщений на відстані 50 км від цієї лінії. Відстані між пультом оператора та БПЛА, пультом оператора та засобом РЕБ, БПЛА та засобом РЕБ становитимуть відповідно:

$$L_{ПБ} = 10 \text{ км};$$

$$L_{ПР} = 60 \text{ км};$$

$$L_{БР} = 50 \text{ км}.$$

Час розповсюдження сигналу між пультом оператора та БПЛА, пультом оператора та засобом РЕБ, БПЛА та засобом РЕБ відповідно становитиме:

$$t_{pPB} = 33 \text{ мкс};$$

$$t_{pPP} = 200 \text{ мкс};$$

$$t_{pBP} = 167 \text{ мкс}.$$

Ключовим параметром, що визначає ефективність засобу РЕБ, є час його реакції на зміну параметрів радіоканалу керування БпЛА. У межах даної роботи час реакції постановника завад визначається як сумарний інтервал:

$$t_{реакц} = t_{ан} + t_{пр} + t_{фс} + t_{вклПП},$$

де $t_{ан}$ – час аналізу прийнятого сигналу,

$t_{пр}$ – час прийняття рішення щодо вибору режиму завад,

$t_{фс}$ – час формування завадового сигналу,

$t_{вклПП}$ – час перемикання режимів підсилювача потужності.

З урахуванням типових технічних характеристик засобів РЕБ [64], можна виділити два характерні режими реагування:

- за невідомої частоти каналу керування, коли час реакції може досягати $t_{реакц.н} \approx 800 \text{ мс}$;
- за відомої або попередньо використовуваної частоти, коли час реакції суттєво зменшується і становить $t_{реакц.в} \approx 40 \text{ мс}$.

Такий розрив у часових характеристиках обумовлений, насамперед, апаратними обмеженнями підсилювачів потужності та елементів комутації. У комплексах попередніх поколінь значний внесок у затримку вносив низькошвидкісний інтерфейс керування, а також інерційність октавних фільтрів, що реалізуються на релейній елементній базі. У сучасних комплексах із високошвидкісними інтерфейсами керування ці затримки можуть бути зменшені, однак час стабілізації високопотужних комутаційних елементів залишається істотним.

У розроблюваній імітаційній моделі приймається консервативне припущення, що відповідає найменш сприятливому для системи зв'язку сценарію: $t_{РЕБ} = 40 \text{ мс}$. Таке значення використовується як фіксований параметр затримки реагування засобу РЕБ у всіх сценаріях моделювання.

Вплив залишкової завади після переключення радіоканалу керування на іншу частоту в межах даної моделі не враховується. Вважається, що засіб РЕБ припиняє постановку завади на попередньому каналі одразу після втрати актуальності цього каналу як цілі пригнічення. Таке припущення дозволяє зосередити увагу на аналізі часової конкуренції між адаптивним алгоритмом БпЛА та реакцією завадового середовища.

Крім того, у базовому сценарії вважається, що потужності випромінювання засобу РЕБ достатньо для повного придушення радіоканалу керування на вході приймача БпЛА. Розгляд випадків часткового пригнічення або адаптивного керування потужністю передачі може бути предметом подальших досліджень і в межах цієї роботи не розглядається.

Таким чином, у створюваній імітаційній моделі автоматизований постановник завад отримує інформацію про частотно-часові параметри каналу керування «вгору» безпосередньо з сигналу $s(t)$ та через інтервал часу $t_{РЕБ}$ формує завадовий вплив на відповідній частоті. Це дозволяє формалізувати динамічну взаємодію адаптивного алгоритму БпЛА з активним завадовим середовищем і використовувати модель для аналізу граничних умов ефективності запропонованих методів обробки параметрів каналу.

Слід зазначити, що запропонована імітаційна модель засобу РЕБ має практичний сенс у контексті реалізації системи зв'язку на програмно-визначеному радіо з можливістю роботи в реальному радіоканалі, зокрема на апаратній платформі USRP B210. Дана платформа забезпечує одночасну передачу та прийом сигналів, підтримує швидке переналаштування частоти, параметрів модуляції та ширини смуги пропускання, а також дозволяє здійснювати безперервне спектральне спостереження без розриву каналу керування. За таких умов часові затримки, покладені в основу імітаційної моделі засобу РЕБ, коректно відображають співвідношення між швидкістю реакції адаптивного алгоритму БпЛА та динамікою завадового впливу в реальному радіоканалі. Таким чином, модель орієнтована не лише на абстрактне

моделювання, а й на подальшу експериментальну верифікацію результатів із використанням SDR-платформ у реальних умовах поширення радіосигналів.

3.3.5 Метод пригнічення каналу РКК БпЛА, реалізований в імітаційній моделі засобу РЕБ (МПК)

Метод пригнічення каналу радіоканалу керування БпЛА, реалізований в імітаційній моделі засобу РЕБ (МПК), ґрунтується на припущенні, що засіб РЕБ має можливість отримувати інформацію про поточні частотно-часові параметри каналу РКК «вгору» та здійснювати постановку завад із затримкою, обумовленою власним циклом управління. Алгоритм роботи МПК складається з таких послідовних кроків (рис. 3.10).

1. На початковому етапі встановлюється значення змінної $ew_on = 1$, що відповідає увімкненому стану засобу РЕБ. Виконується ініціалізація моделі, завантажуються необхідні параметри та службові змінні, зокрема рівень потужності завади та часові характеристики циклу управління.

2. Для імітації отримання від засобу РРТР інформації про діючу частоту передачі каналу РКК «вгору» зчитується значення змінної ch_tx_freq передавача ПО. Це числове значення, що відповідає центральній частоті поточного радіоканалу РКК «вгору» $freq_{ch}(t)$, вираженому в герцах.

3. З метою забезпечення можливості зовнішнього керування роботою засобу РЕБ перевіряється стан змінної ew_on . У випадку, якщо її значення змінюється на 0, алгоритм припиняє виконання, що відповідає вимкненню засобу РЕБ.

4. Якщо значення $ch_tx_freq = 0$, що відповідає відсутності достовірної інформації про роботу передавача пульта оператора, алгоритм повертається до кроку 2 та очікує надходження коректних даних про параметри каналу.

5. Після визначення центральної частоти каналу зчитується значення змінної ch_tx_bw , яка задає смугу пропускання поточного радіоканалу РКК «вгору» $bw_{ch}(t)$, виражену в герцах.

6. Із змінної jam_delay отримується інформація про необхідну затримку увімкнення каналу пригнічення. Дана затримка відповідає часу циклу

управління засобу РЕБ $t_{РЕБ}$, що включає час аналізу сигналу, прийняття рішення та формування завадового впливу.

7. Після закінчення інтервалу часу, рівного $t_{РЕБ}$, здійснюється увімкнення каналу пригнічення. У канал РКК «вгору» додається сигнал завади з центральною частотою $freq_{ch}(t)$ та смугою пропускання $bw_{ch}(t)$. Рівень потужності завади визначається значенням змінної jam_power , яке задається під час ініціалізації моделі та вибирається експериментально достатнім для гарантованого придушення каналу керування за відсутності адаптивного керування потужністю з боку пульта оператора.

8. У процесі роботи алгоритму здійснюється безперервний контроль поточної частоти передачі РКК «вгору». Якщо значення ch_tx_freq змінюється (що відповідає перемиканню каналу керування БПЛА), виконується перевірка відповідності між частотою завади jam_freq та новою частотою каналу.

9. У випадку, якщо частота завади не відповідає поточній частоті РКК «вгору», канал пригнічення вимикається ($jam_on = 0$), після чого алгоритм повертається до кроку 2 для формування нового завадового впливу з урахуванням оновлених параметрів каналу.

10. Якщо ж частота каналу не змінюється та змінна ew_on зберігає значення 1, засіб РЕБ продовжує постановку завади в поточному режимі.

У підрозділі 3.3 сформовано узагальнену модель взаємодії радіоканалу керування БПЛА та засобу радіоелектронної боротьби, яка дозволяє формалізувати процеси спостереження, прийняття рішень і керуючих впливів обох сторін у часовій області. Взаємодія розглянута як антагоністичний процес із власними циклами управління, затримками та обмеженнями на швидкість реакції, що відповідає реальним умовам функціонування безпроводних систем у завадовому середовищі.

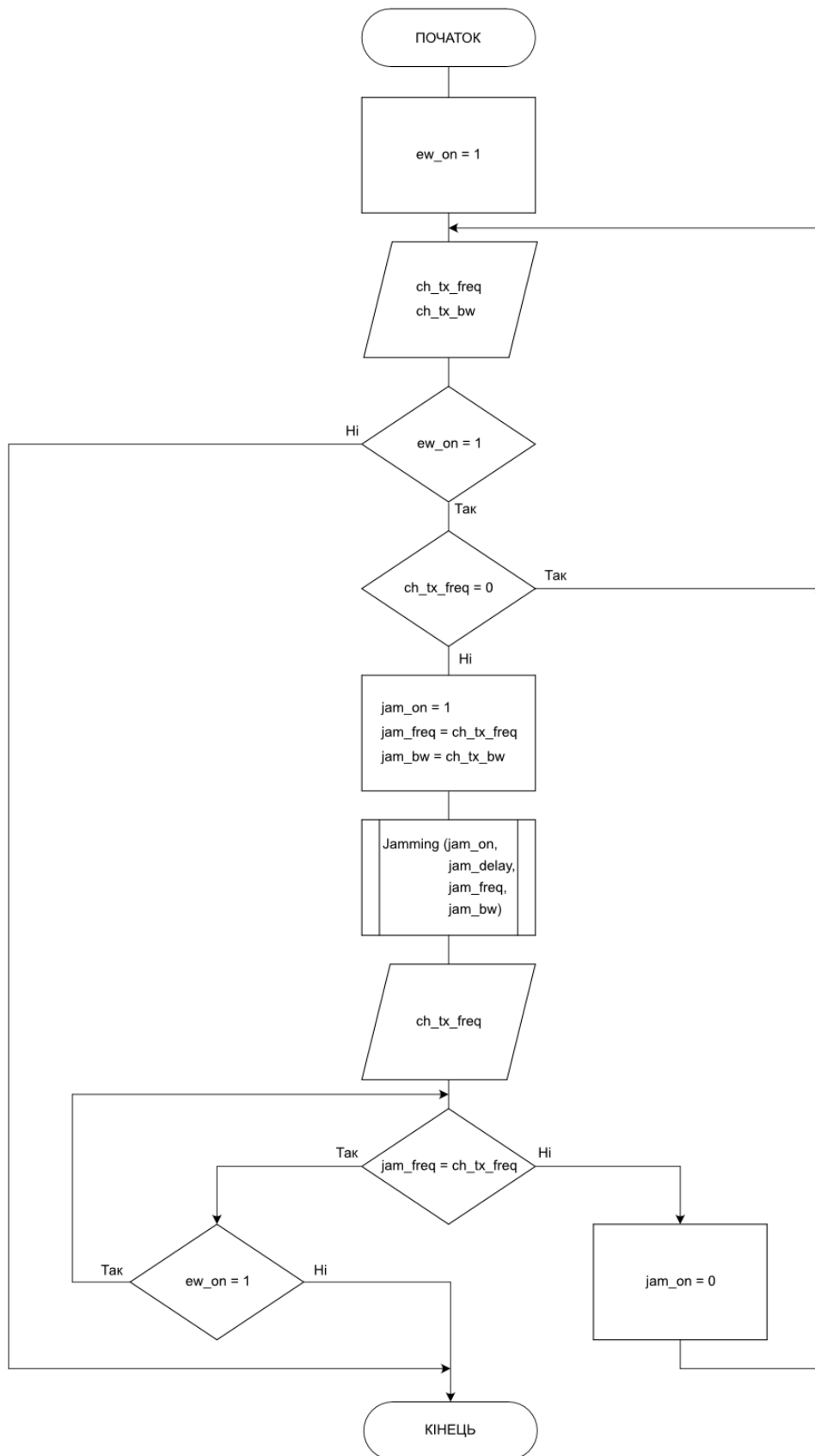


Рисунок 3.10 – Алгоритм реалізації методу МПК

Побудована функціональна та часова моделі дозволили виокремити ключові складові затримок у каналах спостереження, управління та пригнічення, а також показати їхній вплив на ефективність протидії засобам РЕБ. Отримані співвідношення задають зовнішні часові обмеження, у межах яких може здійснюватися адаптивна обробка параметрів каналу керування БпЛА.

На основі сформованої часової моделі розроблено алгоритм роботи імітаційної моделі засобу РЕБ противника (МПК), який враховує різні режими реакції на відомі та невідомі частоти каналу керування, а також апаратні обмеження засобів постановки завад. Запропонований алгоритм не є оптимізаційним, а слугує узгодженою моделлю завадового впливу, придатною для використання в обчислювальних експериментах.

Таким чином, підрозділ 3.3 створює формальну та алгоритмічну основу для подальшого дослідження адаптивних методів обробки параметрів каналу передачі даних і використовується в наступному розділі для аналізу результатів імітаційного моделювання в різних сценаріях застосування засобів РЕБ.

3.4 Алгоритм тимчасового блокування зайнятих каналів

Розробка алгоритму тимчасового блокування каналів є складовою задачі адаптивного керування у динамічних інформаційних системах, що функціонують в умовах невизначеності, затримок та обмеженості доступних ресурсів. У межах даного підходу канали розглядаються як елементи множини альтернатив, вибір яких здійснюється на основі поточних оцінок якості та історії попереднього використання.

На відміну від підходів, що базуються виключно на миттєвих значеннях показників якості, запропонований алгоритм вводить механізм часової пам'яті станів каналів. Це дозволяє враховувати попередні результати їх використання та зменшувати ймовірність повторного вибору каналів, які нещодавно продемонстрували нестабільні характеристики функціонування.

Алгоритм оперує такими вхідними даними:

- індекс каналу (ідентифікатор частоти у сітці);

- потужність виявленої завади на цьому каналі P_{jam} ;
- час безперервного виявлення завади на цьому каналі T_{obs} ;
- кількість каналів, що залишаються доступними для перемикання N_{free} ;
- пріоритетність каналу (враховується для швидшого або повільнішого розблокування);
- історія завадових подій на цьому каналі за певний інтервал часу.

Після виявлення завади на певному каналі, що перевищує допустимі порогові значення для потужності чи тривалості, канал переводиться в режим тимчасового блокування. При цьому обчислюється параметр часу блокування T_{block} , який визначає, коли канал буде дозволено повторно використовувати.

Час блокування пропонується визначати за узагальненою формулою:

$$T_{block} = T_0 \times f(P_{jam}, T_{obs}, N_{free}, H) \cdot W^{-1},$$

де T_0 – базовий час блокування (наприклад, 30 секунд);

f – вагова функція, яка враховує рівень завади, тривалість її дії, кількість альтернатив та вагу каналу;

W – коефіцієнт «ваги» каналу (вищий для бажаних каналів, нижчий для резервних).

Вагова функція може мати вигляд:

$$f = \left(1 + \alpha \times \frac{P_{jam}}{P_{th}}\right) \times \left(1 + \beta \times \frac{T_{obs}}{T_{max}}\right) \times \left(1 + \gamma \times \frac{1}{N_{free} + 1}\right) \times (1 + \delta \times H),$$

де P_{th} – порогова потужність завади;

T_{max} – максимальний час спостереження;

H – кількість епізодів завад на цьому каналі за останній період;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коефіцієнти налаштування впливу окремих факторів.

Зазвичай, при великій кількості вільних каналів алгоритм дозволяє збільшувати час блокування, щоб уникнути передчасного повернення до зашумленої частоти, а при обмеженій кількості вільних каналів час блокування обмежується, щоб зберегти гнучкість системи.

Архітектура алгоритму (логічна послідовність):

- 1) виявлення перевищення порогу завад на каналі;
- 2) виведення каналу зі списку доступних (позначення статусу як «тимчасово заблокований»);
- 3) обчислення часу блокування T_{block} ;
- 4) фіксація часу початку блокування;
- 5) періодичне порівняння поточного часу з моментом блокування + T_{block} ;
- 6) повторна оцінка стану каналу після завершення терміну блокування:
 - якщо завада зникла – канал повертається у список доступних;
 - якщо завада зберігається – канал повторно блокується з подовженим T_{block} .

Запропонований алгоритм тимчасового блокування каналів забезпечує підвищення стійкості адаптивного керування за рахунок виключення повторного вибору каналів, які перебувають у стані деградації або нещодавно демонстрували незадовільні показники якості. Використання часових обмежень на повторне включення каналів до множини доступних дозволяє уникнути циклічних повторень неефективних рішень та стабілізує процес вибору в умовах динамічної зміни характеристик середовища.

З алгоритмічної точки зору запропонований підхід реалізує механізм керування множиною альтернатив із використанням часових міток та обмежень типу «затримка повторного доступу». Це дозволяє узгодити процес прийняття рішень із часовою природою спостережуваних даних, зменшити вплив короткочасних флуктуацій та підвищити передбачуваність поведінки системи в умовах часткової спостережуваності.

Важливою особливістю є можливість асинхронного оновлення інформації про стан каналів, що забезпечує незалежність процесів моніторингу та прийняття рішень. Такий підхід дозволяє оцінювати стан тимчасово заблокованих каналів без впливу на поточний процес вибору, що зменшує затримки оновлення інформації та підвищує актуальність прийнятих рішень. У контексті програмно-

визначених систем це може бути реалізовано шляхом паралельної обробки даних і розділення функцій моніторингу та керування.

Поєднання механізму тимчасового блокування каналів із асинхронним оновленням їх станів формує більш узгоджену модель поведінки адаптивного алгоритму. Це дозволяє зменшити неоднозначність інтерпретації спостережуваних даних, підвищити ефективність використання доступних ресурсів та забезпечити стійкість функціонування системи в умовах нестационарного середовища. Запропонований підхід є алгоритмічно формалізованим, масштабованим і придатним до реалізації в сучасних програмно-керованих системах.

3.5 Алгоритм вибору нового робочого каналу передачі даних

Алгоритм вибору нового робочого каналу передачі даних реалізується як циклічний процес, що поєднує безперервний моніторинг активного каналу, періодичний аналіз спектральної обстановки та прийняття рішень щодо перемикання частоти з урахуванням історії завад і обмежень апаратної платформи.

Основою алгоритму є паспортна таблиця каналів *Channels*, яка містить дискретну репрезентативну множину логічних каналів із фіксованими центральними частотами, смугами пропускання та початковими пріоритетами. Формування та ініціалізація цієї таблиці, включно з описом її полів і типів даних, наведені у Додатку Г (Програмний код Г.1).

Алгоритм складається з шести послідовних етапів, які виконуються циклічно протягом роботи радіоканалу керування.

1) Стартова ініціалізація. На етапі ініціалізації формується множина логічних каналів, задаються межі робочого діапазону частот, смуга пропускання каналів та початкові значення пріоритетів. Один із каналів автоматично призначається активним на основі максимального пріоритету, що дозволяє розпочати сеанс зв'язку без попереднього пошуку.

Паралельно ініціалізується конфігураційна структура `cfg`, яка містить порогові значення метрик якості (SNR , BER , RTT), часові параметри сканування, тривалість блокування каналів і параметри згладжування вимірювань. Детальна програмна реалізація цього етапу наведена у Додатку Г.

2) **Моніторинг активного каналу.** У процесі роботи алгоритм періодично виконує моніторинг активного каналу передачі даних. Для цього з приймального тракту отримуються оцінки відношення сигнал/шум, бітової помилки, затримки та спектральної зайнятості.

Отримані значення оновлюють відповідні поля таблиці `Channels` з використанням експоненційного згладжування, що дозволяє зменшити вплив короткочасних флуктуацій. Механізм оновлення метрик та структура контейнера вимірювань описані у Додатку Г (Програмний код Г.2).

3) **Виявлення деградації та запуск спектрального аналізу.** Після оновлення метрик активного каналу виконується перевірка на перевищення допустимих порогів якості. Якщо хоча б один із критеріїв (SNR , BER або RTT) не виконується, канал вважається проблемним.

У цьому випадку запускається процедура спектрального аналізу альтернативних каналів. З урахуванням можливостей SDR-платформи USRP B210, аналіз може виконуватися асинхронно без повного припинення роботи основного каналу. Для кожного альтернативного каналу оцінюється рівень шуму, зайнятість спектра та прогнозована якість зв'язку. Алгоритмічна реалізація спектрального аналізу наведена у Додатку Д.

4) **Тимчасове блокування проблемних каналів.** Канали, для яких за результатами моніторингу або спектрального аналізу зафіксовано стійку деградацію, переводяться у стан тимчасового блокування. При цьому блокуванню підлягає не лише активний канал, але й кандидатні канали, які не відповідають мінімальним вимогам якості.

Тривалість блокування визначається з урахуванням інтенсивності завади, часу її спостереження, кількості доступних альтернатив і історії попередніх відмов. Заблоковані канали виключаються з подальшого розгляду до завершення

встановленого інтервалу. Механізм блокування та розблокування каналів реалізований у програмному коді, наведеному в Додатку Д.

5) Формування множини кандидатів і вибір нового каналу. Після завершення аналізу формується множина допустимих кандидатних каналів, які:

- не перебувають у стані блокування;
- задовольняють мінімальні вимоги до якості;
- забезпечують необхідну пропускну здатність каналу керування.

Вибір нового робочого каналу здійснюється шляхом ранжування кандидатів за ієрархією критеріїв: *пріоритет* \rightarrow *SNR* \rightarrow *BER* \rightarrow *спектральна зайнятість*. Такий підхід дозволяє поєднати наперед задану політику використання частот із поточним станом радіообстановки. Алгоритм формування множини кандидатів та вибору оптимального каналу наведений у Додатку Е.

6) Перемикання частоти та повторна ініціалізація сеансу. Після вибору нового каналу виконується апаратне перестроювання частоти та повторна ініціалізація сеансу зв'язку, включно із синхронізацією та відновленням протоколу обміну. У разі невдалої синхронізації канал також може бути тимчасово заблокований як непридатний.

Після успішного перемикання новий канал позначається активним, і алгоритм повертається до етапу моніторингу, утворюючи замкнений цикл адаптивного керування.

3.6 Структурна схема реалізації адаптивного методу

3.6.1 Повна структура імітаційної моделі адаптивного каналу керування цільової системи

Розроблена імітаційна модель адаптивного каналу керування (АКК) відтворює повний цикл функціонування системи керування цільового об'єкта в умовах застосування засобів завадового впливу. Вона поєднує апаратну платформу SDR-трансивера, математичну модель каналу зв'язку та алгоритмічне середовище керування частотними ресурсами. *Параметри моделі*

5) Підсистема адаптивного управління частотою (Adaptive Control Core).

Кожна з них реалізує окремий етап процесу – від формування команд до перемикання каналу.

Отримана структура є універсальною основою для подальшого розширення – наприклад, шляхом інтеграції машинного навчання, двоканальної архітектури (Full Duplex USRP B210) або реалізації колективного когнітивного керування спектром у групових польотах БпЛА.

Передавальна підсистема

Передавальна підсистема імітує роботу пульта оператора (ПО) або наземної станції керування. Її головне завдання – формування керуючих команд у вигляді цифрового потоку та їхнє перетворення у фізичний сигнал, придатний для передачі через безпроводний канал зв'язку.

Основні функціональні блоки:

- 1) Bits Generator – створює потік бітів команд, наприклад «TestCommand xxx» у форматі ASCII;
- 2) Frame Assembler – об'єднує 20 повідомлень у кадр, додаючи преамбулу (код Баркера), службову інформацію та CRC-контроль;
- 3) Scrambler / Encoder – виконує скремблювання для уникнення довгих послідовностей нулів або одиниць та, за потреби, кодування помилок (наприклад, convolutional FEC);
- 4) QPSK Modulator – перетворює цифрові біти у комплексні символи I/Q;
- 5) SDR Interface Tx – забезпечує передавання сигналу до SDR-плати або до моделі каналу (у MATLAB – через `System Object comm.SDRuTransmitter`).

На виході формується вектор комплексних відліків $s(t)$ з частотою дискретизації $f_s = 100$ кГц, який надходить у підсистему каналу.

Підсистема безпроводного каналу

Ця підсистема відтворює умови поширення сигналу між пультом оператора та БпЛА, включно з ефектами завад, шумів і затримок.

Компоненти каналу:

1) Variable Delay Block – реалізує змінну затримку за законом «трикутник» або «рампа» для моделювання багатопроменевості та ефекту Доплера;

2) Frequency Offset Block – моделює розсинхронізацію генераторів передавача і приймача (до ± 5 кГц);

3) AWGN Channel – додає білий гаусівський шум із заданим співвідношенням E_b/N_0 ;

4) ECM Interference Profile – формує додатковий сигнал завади $j(t)$ на частоті поточного каналу, який моделює дію засобу РЕБ;

Сумарний сигнал на виході каналу описується рівнянням:

$$x(t) = s(t) + j(t) + n(t),$$

де $s(t)$ – корисний сигнал;

$j(t)$ – зашумлення РЕБ;

$n(t)$ – адитивний шум.

Приймальна підсистема

Приймальна підсистема відповідає за прийом сигналу, синхронізацію, демодуляцію та оцінку якості прийому.

Основні блоки:

1) Automatic Gain Control (AGC) – стабілізує амплітуду сигналу на вході демодулятора;

2) Carrier Recovery – усуває фазовий та частотний зсуви;

3) Symbol Timing Recovery – відновлює часову структуру символів;

4) QPSK Demodulator – перетворює комплексні символи у біти;

5) Descrambler/Decoder – виконує зворотні перетворення (дескремблювання, декодування);

6) CRC Checker – перевіряє цілісність кожного повідомлення;

7) Error Counter & BER Estimator – визначає бітові та кадрові помилки, обчислює BER , PER , PoI .

Отримані показники передаються до підсистеми моніторингу для подальшого аналізу.

Підсистема моніторингу та аналізу завад

Ця підсистема виконує функції «діагностичного ядра» системи. Вона збирає поточні вимірювання параметрів якості каналу та аналізує спектральну обстановку.

Функціональні модулі:

- 1) Quality Metrics Collector – формує структуру $meas = \{SNR_{dB}, BER, RTT, Occupancy\}$ для поточного каналу;
- 2) Threshold Evaluator – порівнює значення метрик із порогами з конфігураційної структури cfg (наприклад, $SNR_{min} = 9$ дБ, $BER_{max} = 10^{-3}$, $RTT_{max} = 100$ мс);
- 3) Spectrum Scanner – тимчасово переналаштовує приймач для зондування альтернативних частот; оцінює рівень шуму, спектральну зайнятість та присутність сигналів;
- 4) EW Detector – виявляє ознаки дії засобів РЕБ (імпульсні або широкосмугові завади, глушіння на конкретних частотах).

Результати моніторингу надходять до адаптивного ядра системи як вхідні дані для прийняття рішень.

Підсистема адаптивного управління частотою

Це головний логічний блок системи, який реалізує когнітивний вибір каналу зв'язку. Основні етапи роботи:

- 1) Виявлення деградації каналу.

Якщо будь-який із параметрів (SNR , BER , RTT) виходить за допустимі межі, генерується сигнал `Channel Fault`.

- 2) Аналіз спектра та формування карти каналів.

На основі результатів сканування будується таблиця `Channels`, у якій для кожного каналу зберігаються: центральна частота, рівень завад, пріоритет, поточний статус (`active`, `candidate`, `blocked`).

- 3) Тимчасове блокування проблемного каналу.

При фіксації завади канал переводиться у статус `blocked` на час T_{block} (відповідно до алгоритму, наведеного у п. 3.4).

- 4) Вибір нового робочого каналу (згідно з алгоритмом п. 3.5).
- 5) Перемикання частоти та повторна синхронізація.

Через API USRP здійснюється апаратне перестроювання частоти приймача/передавача (`setCenterFrequency(fc_new)`), виконується повторна синхронізація PLL і відновлення сеансу зв'язку. Якщо процедура завершується успішно, статус нового каналу змінюється на `active`.

- 6) Оновлення журналу подій та навчання системи.

Кожен акт перемикання реєструється у таблиці `EventLog` із зазначенням часу, причини, попереднього та нового каналу, що дозволяє накопичувати статистику для подальшої оптимізації порогів реагування.

Узагальнення

Отримана структура дозволяє:

- досліджувати динаміку функціонування АКК в умовах завад;
- оцінювати ефективність алгоритмів блокування і вибору каналу;
- моделювати сценарії з різними параметрами завадового впливу;
- масштабувати модель до повнодуплексної архітектури (USRP B210)

або розширених когнітивних стратегій.

Таким чином, структурна схема на рис. 3.11 є інтеграційною основою, яка об'єднує фізичну модель каналу та алгоритмічну модель адаптивного керування в єдину систему дослідження.

3.6.2 Послідовність процесів функціонування моделі АКК

На рисунку 3.12 наведено узагальнену блок-схему взаємодії всіх підсистем і послідовність процесів, що реалізуються під час функціонування адаптивного каналу керування. Блок-схема відображає логіку замкненого циклу роботи системи, у межах якого здійснюється формування сигналу, його передавання через завадове середовище, оцінювання якості прийому та прийняття рішення щодо збереження або зміни робочого каналу.

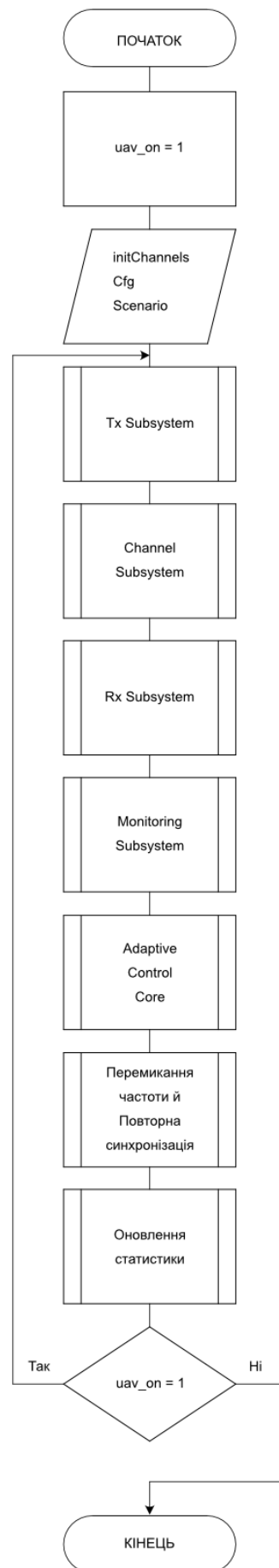


Рисунок 3.12 – Блок-схема взаємодії всіх підсистем моделі АКК

Функціонування моделі відбувається у такій послідовності:

- 1) ініціалізація параметрів (`initChannels`, `Cfg`, `Scenario`);
- 2) формування та передача команд керування (`Tx Subsystem`);
- 3) проходження сигналу через канал із завадами (`Channel Subsystem`);
- 4) прийом і декодування сигналу (`Rx Subsystem`);
- 5) збір метрик якості та аналіз спектра (`Monitoring Subsystem`);
- 6) виявлення деградації, блокування каналу й вибір альтернативного каналу (`Adaptive Control Core`);
- 7) перемикання частоти та повторна синхронізація сеансу;
- 8) оновлення статистики та перехід до нового циклу.

Після завершення цих етапів модель переходить до наступного циклу роботи за умови, що система перебуває у стані активності (`uav_on = 1`).

Представлена блок-схема демонструє інтеграцію підсистем передачі, прийому, моніторингу та адаптивного управління в єдину когнітивну систему зв'язку, здатну функціонувати в умовах динамічної завадової обстановки.

Запропонована імітаційна комп'ютерна модель виступає цілісним дослідницьким інструментом для аналізу процесів адаптивного керування каналами в когнітивних системах у динамічному середовищі з дестабілізуючими впливами. Її структура побудована як інтегрована модель обробки інформації, що поєднує підсистему генерації вхідних даних, модуль оцінювання якості, а також алгоритмічний блок прийняття рішень щодо вибору, блокування та перемикання каналів. Це дозволяє розглядати систему як єдиний динамічний об'єкт із замкненим контуром керування, у якому стан формується внаслідок взаємодії потоків даних, затримок та керуючих впливів.

Модель забезпечує відтворення різних сценаріїв деградації якості передачі інформації шляхом параметризації зовнішніх впливів, що змінюють характеристики вхідних даних у часі. Зокрема, моделюються як стаціонарні, так і нестаціонарні процеси, що впливають на достовірність передачі, включаючи випадкові та детерміновані збурення різної інтенсивності та тривалості. Це

дозволяє досліджувати поведінку системи керування в широкому класі умов та оцінювати її стійкість до змін середовища.

У моделі явно враховуються часові затримки між етапами спостереження, обробки даних, прийняття рішень і реалізації керуючих впливів. Така постановка відповідає класу розподілених інформаційно-керуючих систем із затримками, де рішення приймаються на основі неповної або застарілої інформації. Це дає змогу оцінювати не лише якість окремих алгоритмів, але й їх узгодженість у часі, а також визначати граничні умови ефективного функціонування.

Особливістю моделі є врахування обмежень реалізації алгоритмів у програмно-керованому середовищі. Зокрема, враховуються затрати часу на зміну параметрів, затримки ініціалізації та повторної синхронізації процесів обробки даних. Це забезпечує узгодження теоретичної моделі з практичними умовами її реалізації та дозволяє використовувати результати моделювання для обґрунтування параметрів алгоритмів і архітектурних рішень.

Запропонована імітаційна модель дозволяє досліджувати процеси адаптивного керування каналами як задачу обробки інформації в умовах невизначеності, затримок та обмежених ресурсів. Вона забезпечує формальну основу для аналізу ефективності алгоритмів, їх порівняння та подальшого вдосконалення в межах підходів, характерних для комп'ютерних наук.

3.7 Формалізований опис методу адаптивного вибору робочого каналу керування

Метод адаптивного вибору робочого каналу керування базується на поданні каналу передачі даних як керованої динамічної системи з вектором стану, що відображає енергетичні, спектральні та часові параметри інформаційного процесу.

Нехай у момент часу t система характеризується вектором стану:

$$x(t) = \{SNR(t), BER(t), PER(t), f_c(t), B(t), P_s(t), T_{sync}(t), T_{delay}(t)\},$$

де показники якості передачі (BER , PER), енергетичні характеристики (SNR), параметри несучої частоти f_c , смуги B , потужності P_s та часові параметри синхронізації формують інформаційну основу для прийняття рішення.

Простір допустимих керуючих впливів визначається множиною:

$$U = \{u_i\} = \{(f_c, B, P_s, M, C)\},$$

де M – тип модуляції, C – сигнально-кодова конструкція, а параметри задовольняють апаратні та нормативні обмеження SDR-платформи.

Завадове середовище описується динамічним процесом $w(t)$, що враховує:

- адитивні шумові впливи;
- частотно-селективні завади;
- активний засіб дестабілізуючого впливу із часовим циклом реагування (розвідка – прийняття рішення – формування завади).

Керуючий вплив $u(t)$ визначається як результат багатокритеріального вибору з множини доступних альтернатив $U_{avail}(t)$ шляхом максимізації інтегрального показника якості функціонування каналу $J(x(t), u, w(t))$, що враховує показники BER , PER , енергетичні параметри та часові характеристики переходів.

$$u(t) = \arg \max_{u \in U_{avail}(t)} J(x(t), u, w(t)),$$

де $U_{avail}(t) \subseteq U$ – множина доступних на момент часу t конфігурацій радіоканалу з урахуванням:

- результатів спектрального зондування;
- виявлених пригнічених частот;
- апаратних обмежень SDR;
- часових обмежень реакції системи.

Метод реалізується у вигляді циклічної процедури:

1. Моніторинг стану каналу – оцінювання BER , PER , SNR , часових затримок та показників синхронізації.

2. Виявлення деградації – перевірка умов $BER > BER_{crit}$, або прогноз зниження SNR з урахуванням динаміки завад.

3. Формування множини альтернатив – виключення зайнятих або пригнічених частот та ранжування доступних каналів за багатокритеріальним показником.

4. Випереджальна адаптація – попереднє налаштування сигнально-кової конструкції та параметрів синхронізації з урахуванням прогнозованого моменту перемикавання частоти.

5. Перемикавання каналу та стабілізація – реалізація частотного маневрування з мінімізацією перехідних втрат.

Особливістю методу є врахування часових затримок прийняття рішень та реакції засобів дестабілізуючого впливу, що дозволяє здійснювати адаптацію не лише реактивно, а й проактивно, зменшуючи втрати інформації в перехідних режимах.

Запропонований метод забезпечує узгодженість математичної моделі каналу, імітаційної моделі завадового середовища та алгоритмів адаптивного керування, формуючи єдину формалізовану основу для дослідження та порівняльного аналізу різних стратегій протидії завадовому впливу. Це дозволяє здійснювати обґрунтований вибір алгоритму адаптивного керування для заданого завадового сценарію та сприяє підвищенню достовірності передачі і збереженню цілісності кодових конструкцій каналу керування.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 удосконалено модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами каналу передачі даних шляхом інтегрованого використання обчислювальної моделі каналу, метрик цілісності даних та часової динаміки і історії станів каналу для реалізації багатокритеріального оцінювання його стану. Розроблено метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів та сформовано його алгоритмічну, інформаційну й структурну основу як задачі комп'ютерного

моделювання, аналізу станів і прийняття рішень у динамічному середовищі. За результатами проведеного дослідження отримано такі висновки.

1. Сформульовано принципи адаптивного керування параметрами каналу передачі даних як сукупності процедур безперервного моніторингу, аналізу стану, виявлення деградації та формування керуючих дій щодо зміни параметрів передачі даних. Це дозволило подати канал передачі даних як динамічний об'єкт керування, стан якого змінюється під впливом як внутрішніх алгоритмів системи, так і зовнішніх дестабілізуючих факторів.

2. Розроблено метод вибору каналів зв'язку на основі скінченної множини допустимих альтернатив, для яких задаються центральні частоти, смуги пропускання та пріоритети використання. Показано, що введення етапу передексплуатаційного програмування параметрів каналів створює інформаційну основу для подальшого адаптивного керування та дозволяє враховувати апіорні знання про спектральну обстановку як елемент задачі прийняття рішень.

3. Запропоновано спосіб формалізованого подання результатів моделювання у вигляді багатовимірному масиву даних, таблично-часових структур та сценарного каркаса, що забезпечує уніфіковане зберігання, оброблення та порівняння результатів для різних режимів функціонування каналу. Такий підхід створює цілісну обчислювальну інфраструктуру для комп'ютерного експерименту та відповідає методології комп'ютерних наук щодо організації даних і відтворюваності результатів.

4. Обґрунтовано систему показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі інформації, зокрема на основі використання BER, PER та інтегральних і ковзних метрик, придатних для аналізу функціонування системи в умовах динамічної завадової обстановки та забезпечення адаптивного керування параметрами передачі даних.

5. Розроблено алгоритм реагування на деградацію діючого каналу, який базується на порівнянні поточних метрик із пороговими значеннями, виявленні ознак зовнішнього впливу та формуванні рішення про збереження, блокування

або заміну активного каналу. Запропонований підхід реалізує правило-орієнтований механізм адаптивного керування, придатний для функціонування в умовах неповної інформації та часових обмежень.

6. Обґрунтовано процедуру виключення діючого каналу із зондування, яка забезпечує розмежування процесів контролю поточного каналу та пошуку альтернативних каналів. Це підвищує визначеність алгоритму, зменшує неоднозначність інтерпретації результатів вимірювань і покращує якість підготовки множини кандидатів для подальшого перемикання.

7. Формалізовано фонові умови функціонування каналу передачі даних в середовищі активного дестабілізуючого впливу та побудовано модель взаємодії каналу, системи керування і зовнішнього середовища. Показано, що така взаємодія має багатомасштабний часовий характер і повинна розглядатися як процес оброблення інформації та прийняття рішень за наявності затримок, асинхронності та невизначеності.

8. Побудовано часову модель взаємодії каналу передачі даних та зовнішнього впливу, яка враховує затримки спостереження, аналізу, формування рішень і реалізації керуючих дій. Отримані співвідношення дозволили визначити допустимі часові інтервали функціонування адаптивного алгоритму та обґрунтувати необхідність використання інтегральних і ковзних метрик якості для стійкого реагування на зміни стану середовища.

9. Розроблено алгоритм тимчасового блокування каналів, який запобігає повторному вибору каналів, що нещодавно зазнали дестабілізуючого впливу, та зменшує ризик циклічних перемикань між непридатними альтернативами. Значення цього алгоритму полягає у введенні механізму часової пам'яті станів каналу, що підвищує стабільність адаптивного керування в умовах динамічної зміни параметрів середовища.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

У даному розділі наведено результати верифікації імітаційної комп'ютерної моделі каналу передачі даних, структурна схема якої представлена на рисунку 2.6, а також результати подальшого моделювання з використанням розробленої моделі адаптивного каналу керування (АКК).

На першому етапі виконано верифікацію базової моделі шляхом порівняння отриманих результатів із теоретично очікуваними залежностями для відомих типів модуляції та завадових впливів. Здійснено перевірку коректності відтворення часової динаміки відношення сигнал/шум, ймовірності бітових помилок (*BER*) та інших показників якості передачі. Це дозволило підтвердити адекватність моделі щодо відображення впливу адитивних і структурованих завад, а також нестационарності каналу.

На другому етапі проведено обчислювальні експерименти з використанням моделі АКК, що реалізує алгоритмічний механізм адаптивного керування параметрами каналу. У межах експериментів досліджується поведінка цільової системи за різних сценаріїв навмисного завадового впливу, зокрема при зміні рівня завад, частотної структури впливу та часових характеристик атак.

Порівняльний аналіз результатів функціонування цільової системи з адаптивним і неадаптивним керуванням дозволяє кількісно оцінити ефективність запропонованого методу. Оцінювання здійснюється за показниками *BER*, інтегральної якості передачі, часу деградації каналу та швидкості відновлення працездатності після зміни умов середовища.

Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивного управління параметрами бездротового каналу для підвищення інформаційної стійкості цільової системи в умовах навмисних завад.

4.1 Верифікація адекватності імітаційної моделі каналу передачі даних

Перед дослідженням ефективності запропонованого методу адаптивного керування параметрами каналу було виконано верифікацію адекватності розробленої імітаційної моделі каналу передачі даних (розділ 2). Метою

верифікації є підтвердження відповідності поведінки моделі відомим теоретичним закономірностям цифрових систем зв'язку та фізичним характеристикам реальних SDR-платформ.

4.1.1 Постановка задачі верифікації

Верифікація здійснювалася за такими формальними критеріями:

- 1) енергетична адекватність – відповідність залежності BER від Eb/No теоретичній характеристиці QPSK у каналі AWGN;
- 2) динамічна адекватність – коректне відтворення процесу входження приймача у синхронізм;
- 3) частотна адекватність – відповідність впливу параметра `FrequencyOffset` реальним значенням нестабільності генераторів;
- 4) часова узгодженість – коректне відображення часових інтервалів стабілізації приймача відносно циклу реагування засобу пригнічення;
- 5) стійкість до зниження SNR – поява повної втрати кадрів при критичних значеннях Eb/No .

Таким чином, перевірка проводилася не лише на якісному, а й на кількісному рівні.

4.1.2 Верифікація енергетичних характеристик

Було проведено серію експериментів при:

$$Eb/No \in \{12\text{дБ}, 11\text{дБ}, 10\text{дБ}\}.$$

На першому кроці було отримано графік (рис 4.1), який демонструє характерну поведінку системи зв'язку у фазі початкової синхронізації, коли рівень енергетичного співвідношення $Eb/No = 12$ дБ є вже достатнім для надійної роботи після короткого періоду адаптації.

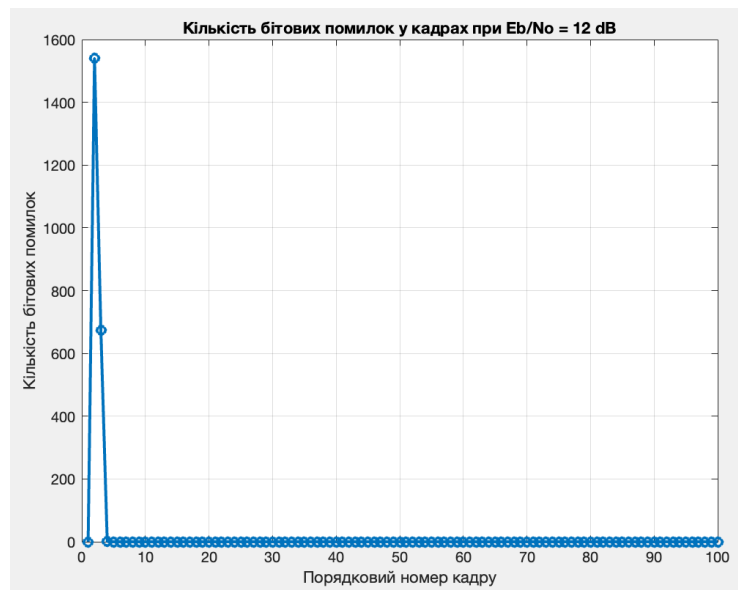


Рисунок 4.1 – Кількість бітових помилок у кадрах при $E_b/N_o = 12$ дБ

Рисунок 4.2 відображає результати декодування команд при $E_b/N_o = 12$ дБ. Повідомлення «TestCommand» пошкоджені у верхній частині списку, символи спотворені, з'являються випадкові знаки. Це вказує на помилки декодування через втрату синхронізації. Починаючи з «TestCommand 040», усі повідомлення декодуються коректно.

```
PreambleDetectionThreshold: 20
MessageBits: [11200x1 double]
BerMask: [1540x1 double]

0 Gn vLmt'~0
TestCommameIyF 7Xt" v` ) @M 022
TestCommi[9
wh:R= Gn vKD d 024
TestCommh3N07Xt" v` (M 026
TestCommamN/(R= Gn vLmtx YH0 TestCommand 01i "*u+v` A< = Gmc mand 031
TestCommam) 6Ep< ?i@=+XbCZQ
wk_7["$" ;Wmand 034
TestCommand 03A <c;gv vLmt$YEu+ (~W*<OuTMF` |M7Xt" v` A< < ?i@=+XbCZQ
wkFRDestCommand 040
TestCommand 041
TestCommand 042
TestCommand 043
TestCommand 044
TestCommand 045
TestCommand 046
TestCommand 047
TestCommand 048
TestCommand 049
TestCommand 050
TestCommand 051
TestCommand 052
TestCommand 053
TestCommand 054
```

Рисунок 4.2 – Результати моделювання, що показують помилки прийому перших 40 тестових команд при $E_b/N_o = 12$ дБ

Наступним кроком зменшувався рівень енергетичного співвідношення E_b/N_0 до 11 дБ. Слід зазначити, що кількість помилок аналізувалася саме у корисному навантаженні кадрів, при цьому незмінними залишалися частотний зсув і часова затримка у каналі зв'язку (рис. 4.3).

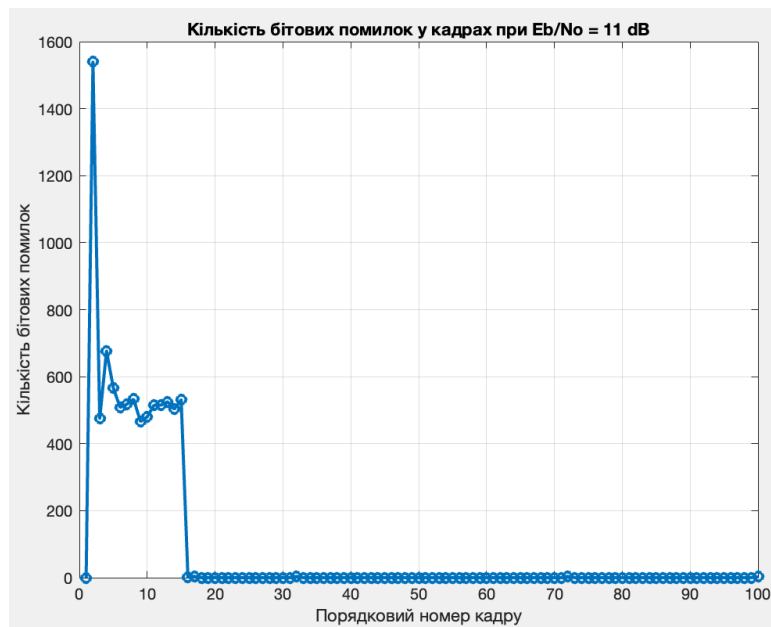


Рисунок 4.3 – Кількість бітових помилок у кадрах при $E_b/N_0 = 11$ дБ

Спостерігалася характерна для цифрових систем зв'язку поведінка: поступове входження в синхронізм на фоні постійного рівня шуму ($E_b/N_0 = 11$ дБ). У першому кадрі налічувалося 1540 помилок, тобто повна втрата корисного навантаження. Це типова ситуація для першого кадру після запуску системи, коли синхронізація ще не відбулася. У кадрах з 2 по 14 спостерігалася поступове зниження кількості помилок – система ще не стабілізувала фазу та частоту, але вже розпізнає преамбулу й починає коректно декодувати частину бітів (рис 4.4). Починаючи з кадру 15 кількість помилок наближалася до нуля – система повністю синхронізована, усі внутрішні контури PLL тощо стабільно працюють.

```

TestCommand 0A5
U6ouPHLLmt $YH)wXt" v` +i
57
TestCommameH058
Z%n05w v
V+:FR esu$Hq!mt $YI * Px! |G&=D 061
TestCopc!sfIE + (~W*<OuTJ{ }%s
TestCommand
646 I. vLmt $Z 7Xt,M92mm|nd 066
Test7l=n0= 0wg(R= Gn vLmt $Z l{ 6Zc ?mmand 069
TestCommao h2 * Py a[zch3N]vR= Gn q H SPc` 72
TestCommand 073
Tesz ommand#` 77 TbTZv mY< cKdJdR= Gn vLmt $YJb< ?i@+=XbCZQ
wdM7Xt" v` A</ + (~W*<OuTMF`sFRDestCommand 080
TestCommand 081
TestCommand 082
TestCommand 083
TestCommand 084
TestCommand 085
TestCommand 086
TestCommand 087
TestCommand 088
TestCommand 089
TestCommand 090

```

Рисунок 4.4 – Результати декодування команд при $E_b/N_0 = 11$ дБ

Наступний графік (рис. 4.5) відображає розподіл кількості бітових помилок у кадрах при фіксованому рівні енергетичного співвідношення $E_b/N_0 = 10$ дБ. Він є наочним свідченням адекватності моделі, яка правильно реагує на деградацію якості каналу у цифровій системі зв'язку. На графіку спостерігаються періодичні сплески до 1540 помилок, що свідчить про повну втрату корисного навантаження в окремих кадрах. Причиною є невдале відновлення фази/частоти або проблеми із синхронізацією символів в умовах недостатнього рівня співвідношення E_b/N_0 . При QPSK навіть невеликий фазовий зсув у «зашумленому» середовищі може спричинити масові помилки демодуляції.

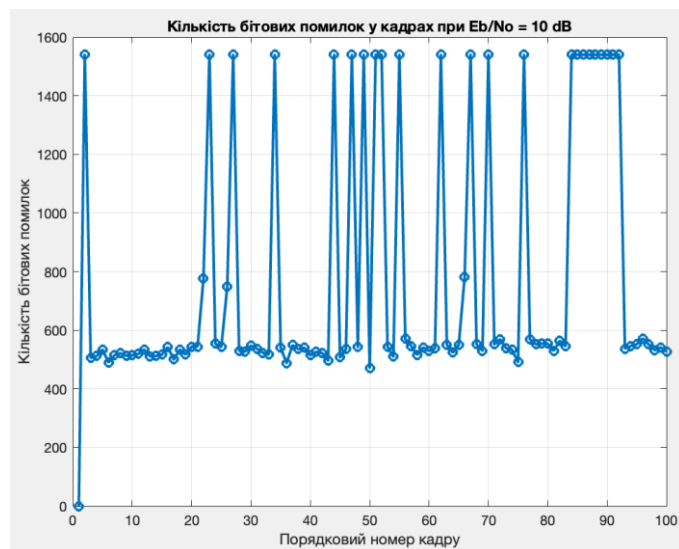


Рисунок 4.5 – Кількість бітових помилок у кадрах при $E_b/N_0 = 10$ дБ

Результат декодування команд наведено на рисунку 4.6. Лише частина символів розпізнається коректно.

```

MessageBits: [11200x1 double]
BerMask: [1540x1 double]

Tesu$UvLm{Yt020
U1Gn kU nd [7Xt" 2mmanhA<#p< 3tComWIZQ
wg
TestB vLmt 4D24
ThPy a[G.d +7Xt" q(Mmand 8#u+ 6)@CommfCF`BTest@#6Lmtx 028
T/i@=+Xb@nd 05 gXt" aMmand L =D Comm $YEw*TestB Lmt $ 32
Tf# =+XbC 4 033
(t" v`$ and' U * S Commanz3NRdR>%stComV-t $YE
Tesu,T0uTMF `37
Ta v` (# 03?m i@=+%jAnd >0FR Gn v0And 040naM 20E-mand 1G 7Xt" Commani)<.,
V+9:_ estCojxmt $YKHJTestC = &?4U t5
Teny00 t
46
TxU+v` 047

```

Рисунок 4.6 – Результати декодування команд при $E_b/N_0 = 10$ дБ

Результати моделювання демонструють, що:

- при $E_b/N_0 = 12$ дБ спостерігається повне відновлення корисного навантаження після короткого початкового періоду синхронізації;
- при $E_b/N_0 = 11$ дБ час входження у синхронізм зростає, але після стабілізації BER наближається до нуля;
- при $E_b/N_0 = 10$ дБ фіксуються періодичні повні втрати кадрів (≈ 1540 помилок), що відповідає теоретичній деградації QPSK при зниженні SNR.

Отримана залежність відповідає аналітичній формулі для QPSK:

$$BER = Q\left(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0}\right),$$

що підтверджує енергетичну адекватність моделі [100].

4.1.3 Верифікація частотної моделі

На основі зображення (рис. 4.2), яке відображає результати декодування команд при $E_b/N_0 = 12$ дБ, отримано важливий висновок, а саме: за результатами моделювання, приймач входить в синхронізацію занадто довго, протягом перших двох кадрів (близько 45 мс). Тобто, для «найгіршого» випадку, а саме застосування сучасного військового комплексу РЕБ, здатного переналаштовуватися на потрібну частоту за 40 мс, ймовірність повного придушення каналу РКК досить висока. Ще довше триває процес синхронізації при $E_b/N_0 = 11$ дБ (рис. 4.4).

В результаті проведення серії експериментів, було визначено, що ключовим фактором, який впливає на швидкість входження системи у синхронізм є параметр `FrequencyOffset` – частотний зсув сигналу, що виникає у результаті недосконалості генераторів задаючої частоти передавача й приймача або через ефект Доплера під час руху джерела сигналу (у даному випадку БпЛА).

Нестабільність типового кварцевого генератора (QXO – quartz crystal oscillator), який використовується у радіоелектроніці БпЛА, визначається через частотний дрейф, або частотну нестабільність, тобто наскільки змінюється реальна частота генератора відносно номінальної. Зазвичай подається у вигляді відносної похибки:

$$\Delta f/f = \pm(10^{-6} \text{ до } 10^{-8}) \text{ або } \pm (1 \text{ ppm до } 0,01 \text{ ppm})$$

Приклад розрахунку для передавача з центральною частотою 5.0 ГГц і точністю 1,0 ppm (*parts per million*, або мільйонна частка):

$$\Delta f = 5,0 \times 10^9 \times 10^{-5} = 5000 \text{ Гц} = 5 \text{ кГц}$$

Розрахунок ефекту Доплера для БпЛА при швидкості 30 м/с і частоті 5,0 ГГц:

$$\Delta f_{\text{Доплер}} = \frac{v}{c} \times f = \frac{30}{3 \times 10^8} \times 5,0 \times 10^9 = 500 \text{ Гц.}$$

Частотний зсув через ефект Доплера відносно малий, але його також слід враховувати разом із дрейфом генератора.

За замовчуванням, частотний зсув у досліджуваній імітаційній моделі було встановлено в значення 5 кГц, що є цілком реалістичним при роботі в діапазоні 5 ГГц та застосуванні ТСХО (Temperature-Controlled Crystal Oscillator) – кварцевого генератора із вбудованою температурною компенсацією, який забезпечує стабільну частоту генерації у межах $\pm 1,0$ ppm, незважаючи на зміни температури навколишнього середовища. Це джерело тактової частоти для систем, де потрібна вища стабільність, ніж у звичайного кварцевого генератора

(ХО), але без складності та енергоспоживання термостабілізованих генераторів (OCXO – Oven Controlled Crystal Oscillator).

Розробник обраної апаратної платформи Ettus Research пропонує модуль GPSDO-TCXO (рис. 4.7), який можна встановити у пристрої SDR, зокрема USRP B210, з метою забезпечення високої стабільності частоти та глобальної часової синхронізації [77]. Застосування цього модуля безпосередньо впливає на час входження в синхронізм приймача і загальну якість прийому в реальних умовах.



Рисунок 4.7 – Модуль GPSDO-TCXO

GPSDO (GPS Disciplined Oscillator) – це високоточний генератор частоти, який поєднує TCXO (термокомпенсований кварцовий генератор, що забезпечує стабільність частоти в межах $\pm 0,5$ ppm) із GPS-еталоном, який регулярно коригує відхилення TCXO для досягнення ще вищої точності (до $\pm 0,01$ ppm), а також генерує частоту 10 МГц для синхронізації SDR і сигнал 1 PPS (one pulse per second) для глобального часу.

Для даної імітаційної моделі, яка є досить чутливою до часу, необхідного для входження цільової системи у синхронізм, з урахуванням застосування модуля GPSDO-TCXO, параметр `FrequencyOffset` було зменшено до величини 1800 Гц, а результат декодування команд при цьому наведено на рисунку 4.8.

```

MessageBits: [11200x1 double]
BerMask: [1540x1 double]

W5qLCq .1 d , ^~K@ QX:= &?4o 7Xt" v` A<!;wXt" v` A<!;R= Gn vLmt $YD\NaM 20Y
V+6(R= Gn vLmt $YDGwXt" v` A<#!7Xt" v` A<"YYvZ %XN= &?4o vR= Gn vLmt $YG;wX
V+5M7Xt" v` A<"GwXt" v` A<"FR estCommand 020
TestCommand 021
TestCommand 022
TestCommand 023
TestCommand 024
TestCommand 025
TestCommand 026
TestCommand 027
TestCommand 028
TestCommand 029
TestCommand 030
TestCommand 031
TestCommand 032
TestCommand 033
TestCommand 034
TestCommand 035
TestCommand 036

```

Рисунок 4.8 – Результати декодування команд при значенні

$\text{FrequencyOffset} = 1800 \text{ Гц}$ та $E_b/N_o = 11 \text{ дБ}$

4.1.4 Верифікація часової узгодженості з моделлю завадового впливу

Результати, отримані при верифікації адекватності моделі, свідчать, що реалізована система з покращеною стабільністю частоти задаючого генератора здатна забезпечити вхід у синхронізм приймача протягом одного кадру тривалістю приблизно 23 мс при швидкості передачі 100 кбіт/с. Це означає, що вже в межах першого кадру системи відновлення частоти, фази та часової структури сходяться до стійкого стану, що дозволяє надійно декодувати корисне навантаження (рис. 4.8).

У випадку, коли засіб пригнічення потребує близько 40 мс для налаштування на нову робочу частоту каналу керування, система має гарантоване часове вікно тривалістю не менше ніж 17 мс (40 мс – 23 мс) для передачі корисних даних без загрози пригнічення. Таким чином, навіть при фіксованій швидкості 100 кбіт/с можливо забезпечити надійну передачу коротких команд керування в межах одного сеансу зв'язку до того, як противник встигне адаптувати свої засоби пригнічення.

Це означає, що модель відтворює фізично коректну ситуацію конкурентної взаємодії: канал встигає передати мінімальний обсяг керуючої інформації, але залишається вразливим при погіршенні синхронізації. Цей результат узгоджується з антагоністичною моделлю розділу 3.

4.1.5 Перевірка масштабованості швидкості передачі

У разі необхідності розширення корисного часового вікна або збільшення кількості інформації, яка може бути доставлена до моменту пригнічення, можливо реалізувати підвищення швидкості каналу. Наприклад, при збільшенні швидкості до 200 кбіт/с тривалість кадру зменшиться до 11,3 мс, а отже, ефективне вікно передачі зростає до 28,7 мс, що дозволяє передавати декілька кадрів поспіль із командною інформацією.

Варто зазначити, що підвищення швидкості потребує ретельнішого налаштування систем синхронізації, але в межах діапазону 150–250 кбіт/с при стабільному відношенні $Eb/No \approx 11\text{--}12$ дБ система демонструє збереження стійкості до завад та низький рівень BER , що підтверджує її коректну масштабованість.

4.1.6 Узагальнений висновок щодо адекватності

За результатами верифікації встановлено:

1. Модель відтворює теоретичну залежність BER від Eb/No .
2. Процес входження у синхронізм має фізично обґрунтовану динаміку.
3. Вплив частотної нестабільності відповідає реальним характеристикам SDR-платформи.
4. Часові співвідношення узгоджуються з моделлю активної РЕБ.
5. Модель демонструє прогнозовану деградацію при зниженні SNR .

Отже, імітаційна модель каналу передачі даних є адекватною об'єкту дослідження та може використовуватися для оцінювання ефективності методу адаптивного керування параметрами каналу передачі даних.

4.2 Початкові умови та сценарії експериментів

У рамках побудованої імітаційної моделі було послідовно сформовано три сценарії, які відрізнялися рівнем складності та поведінкою засобу пригнічення. Кожен сценарій мав на меті відтворити характерні умови протидії в різних тактичних ситуаціях та оцінити реакцію адаптивного каналу керування безпілотною літальною апарата.

На першому етапі моделювання розглядався адаптивний режим роботи каналу, коли засіб РЕБ здатний швидко перебудовуватися на робочу частоту пульта оператора. Час реакції РЕБ у цьому сценарії становив 40 мс, що імітує умови активного «переслідування» частоти керування. У цьому режимі моделюється ситуація, коли противник постійно сканує спектр і намагається миттєво пригнічувати будь-яку частоту, яку використовує система керування БпЛА. Основна мета цього сценарію полягає у перевірці стійкості алгоритму частотного перестроювання під час високої динаміки змін у спектрі, коли кожна нова частота може бути майже негайно виявлена та заглушена.

На другому етапі модель було наділено більшою реалістичністю, щоб урахувати ефект «пам'яті» засобу пригнічення. Передбачено два часові параметри реакції:

- при появі нової частоти, раніше невідомої засобу пригнічення, час переналаштування становить 800 мс;
- при повторному виявленні відомої частоти, яка вже збережена у пам'яті, – 40 мс.

Такий сценарій відображає більш реалістичну роботу сучасних систем РЕБ, які накопичують інформацію про частотні «сліди» ворожих сигналів та реагують на них із різною швидкістю. У межах цього етапу моделюється поступове розширення бази відомих частот і зростання ефективності пригнічення у міру тривалості експозиції сигналу керування. Особлива увага приділяється реакції адаптивного модуля у моменти, коли засіб пригнічення переходить із фази пошуку до фази «переслідування» відомих частот.

Третій сценарій призначено для порівняння адаптивного та неадаптивного (статичного) режимів роботи при входженні БпЛА в зону дії окопного засобу РЕБ із фіксованими смугами випромінювання. У цьому випадку моделюється ситуація, коли засіб пригнічення залишається активним постійно, без переслідування, але з високою потужністю випромінювання у кількох діапазонах. На сотій секунді симуляції передбачено момент активації засобу

пригнічення, після чого канал зв'язку потрапляє під дію завад у своїй робочій смузі.

Для обох варіантів (адаптивного та статичного) використовуються однакові початкові умови, що дозволяє виконати коректне порівняння ефективності збереження зв'язку, швидкості реакції системи та накопичення помилок під впливом завад.

Такий послідовний підхід дає змогу дослідити роботу адаптивного алгоритму в трьох ключових сценаріях:

- 1) швидкодіючий військовий комплекс РЕБ (реакція 40 мс);
- 2) військовий комплекс РЕБ із пам'яттю частот (реакція 800/40 мс);
- 3) статичний багатосмуговий РЕБ при вмиканні на 100-й секунд.

Це дозволяє простежити еволюцію реакції системи керування від умов постійного динамічного переслідування до ситуації раптової появи потужних фіксованих завад і створює базу для подальшого аналізу отриманих часових залежностей $SNR(t)$, $BER(t)$ та інтегрального $BER_{int}(t)$ у наступних підпунктах.

4.3 Часова динаміка перемикань

Часова структура переналаштувань робочої частоти є одним із ключових показників ефективності адаптивного каналу керування, оскільки саме вона визначає швидкість реакції системи на завади та здатність утримувати зв'язок у динамічному радіоспектрі. Для оцінки цієї властивості було проаналізовано часові послідовності перемикань частоти $ch_{active}(t)$, отримані під час трьох сценаріїв, описаних у пункті 4.2.

Аналіз результатів моделювання проводився з позицій оцінювання цілісності інформаційних процесів, а не характеристик конкретної апаратної реалізації каналу. У першому сценарії, коли засіб пригнічення переналаштовувався на нову частоту протягом 40 мс, спостерігалася найбільш інтенсивна динаміка перемикань (рис. 4.9).

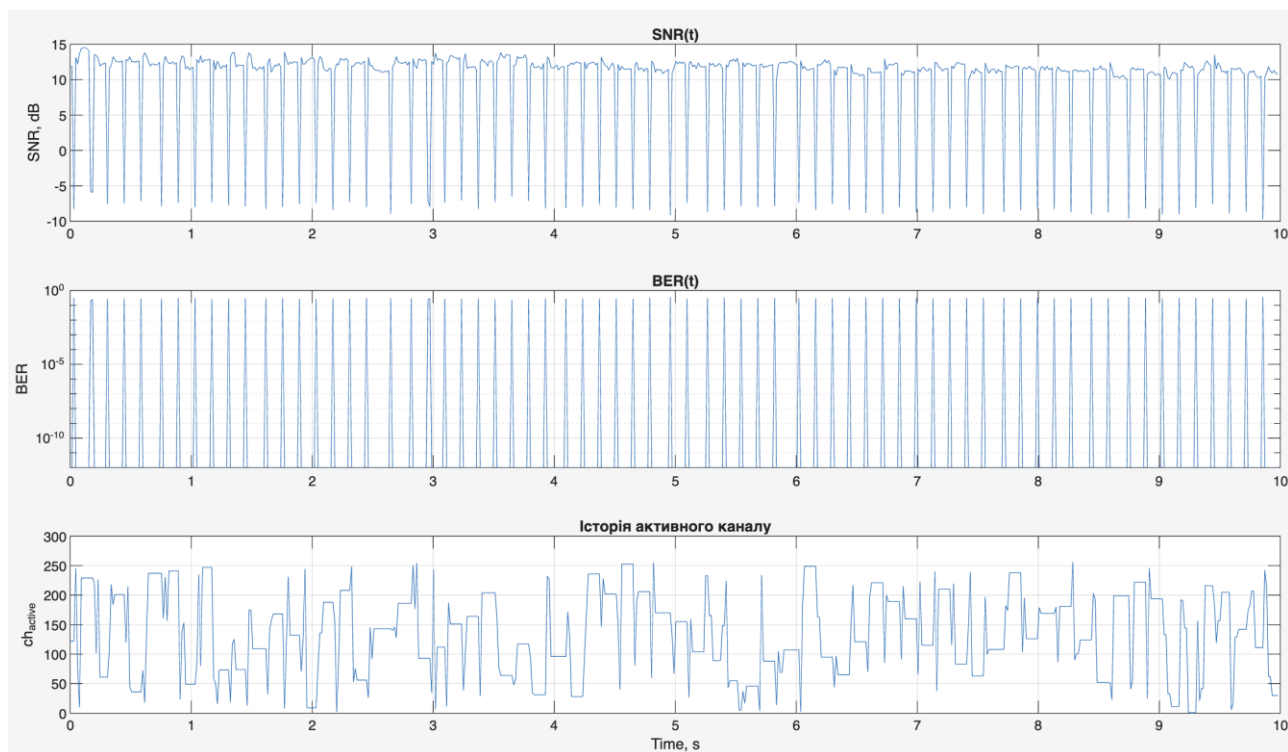


Рисунок 4.9 – Часова діаграма роботи адаптивної системи керування
(час реагування – 40 мс)

На цій часовій діаграмі зображено роботу адаптивної системи керування у найскладнішому режимі, коли засіб пригнічення має мінімальний час реагування – лише 40 мс. Це означає, що противник практично миттєво переналаштовується на нову частоту після кожного перемикання, намагаючись продовжити пригнічення. Проте, навіть за таких екстремальних умов, система продовжує функціонувати та зберігає можливість передачі коротких або критичних команд.

Верхній графік – $SNR(t)$, показує миттєве співвідношення сигнал/шум у каналі зв'язку. Бачимо періодичні різкі провали SNR до значень близьких до 0 або навіть нижчих. Це моменти, коли засіб пригнічення ефективно знаходить активну частоту та починає її глушити. Між провалами SNR піднімається до робочого рівня 10–13 дБ, що означає наявність коротких, але стабільних інтервалів зв'язку. Ці інтервали тривають лише десятки або сотні мілісекунд, проте цього достатньо для передачі коротких службових пакетів – наприклад, команд стабілізації або підтвердження зв'язку. Таким чином, навіть коли

середовище насичене завадами, канал не є повністю втрачений – існують «вікна зв'язку», у які передавач встигає передати критично важливу інформацію.

Середній графік – $BER(t)$, відображає динаміку коефіцієнта бітових помилок. У моменти глушіння (провали SNR) BER зростає до 0,5, що означає повну втрату кадрів. В інші моменти BER швидко повертається до дуже низьких значень ($10^{-6} - 10^{-9}$), тобто зв'язок стає практично безпомилковим. Це чергування високих і низьких значень демонструє, що система здатна швидко відновлювати цілісність каналу після атаки. В реальних умовах це означає, що навіть під час активного пригнічення кадри не втрачаються безповоротно: при правильному виборі параметрів кодування або повторної передачі можлива стабільна доставка коротких пакетів у міжзавадові інтервали.

Нижній графік – історія активного каналу ($ch_{active}(t)$), показує частоту перемикань каналів системою. Часті ступінчасті стрибки означають, що адаптивне ядро постійно змінює частоту, уникаючи поточного глушіння. Висока щільність перемикань свідчить про агресивну поведінку засобу пригнічення (час реакції лише 40 мс), а також про високу швидкодію системи керування – вона встигає переналаштувати робочу частоту ще до повної деградації зв'язку. Попри постійні переходи, система не «зависає» і не потрапляє у стан втрати синхронізації. Кожен новий канал дає короткий інтервал для передачі, після чого процес повторюється.

Тепер розглянемо більш реалістичний сценарій роботи засобу пригнічення, який наближений до фізичних характеристик реальних засобів радіоелектронної боротьби. У цій моделі система противника має два варіанти реагування:

1) при переході цільової системи на нову невідому частоту – засіб пригнічення витрачає приблизно 800 мс на пошук і визначення її робочих параметрів;

2) Якщо частота вже відома (знаходиться у пам'яті засобу пригнічення) – система перебудовується майже миттєво, за ≈ 40 мс, і відновлює глушіння.

Такий підхід моделює не ідеального, а реалістичного противника з певними часовими затримками пошуку, аналізу сигналу та переналаштування генераторів, підсилювачів, антенних комутаторів. На верхньому графіку (рис. 4.10) спостерігаються періодичні провали SNR , але тепер між ними чітко видно довші ділянки стабільного зв'язку – тривалістю приблизно 0,8–1,0 секунди.

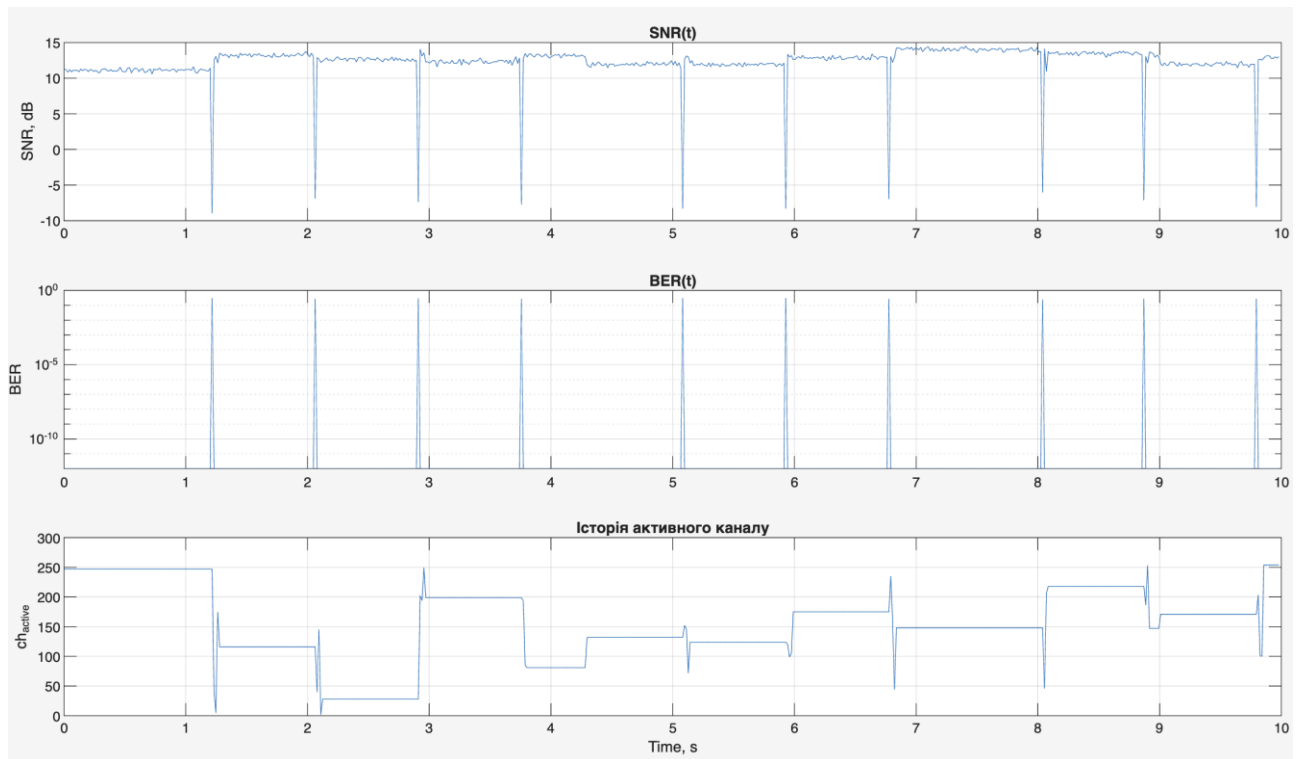


Рисунок 4.10 – Часова діаграма роботи адаптивної системи (час реагування на невідому частоту – 800 мс)

Коли система РЕБ виявляє нову частоту, їй потрібен час (~ 800 мс), щоб просканувати ефір, знайти потрібний сигнал, визначити параметри модуляції та сформувати заваду потрібної смуги. Протягом цього періоду безпроводний зв'язок залишається робочим, і цільова система може безперешкодно отримувати команди керування. Як тільки засіб пригнічення «навчається» на цю частоту, його час реагування скорочується до 40 мс. Це відображається на графіку (рис. 4.11) як короткі, часті провали SNR – ознаки того, що засіб пригнічення уже знає цю частоту й глушить її майже миттєво. Збільшивши тривалість спостереження до 300 с, бачимо як засіб пригнічення пришвидшує

свою реакцію через використання імітаційною моделлю адаптивного каналу керування «відомих» частот.

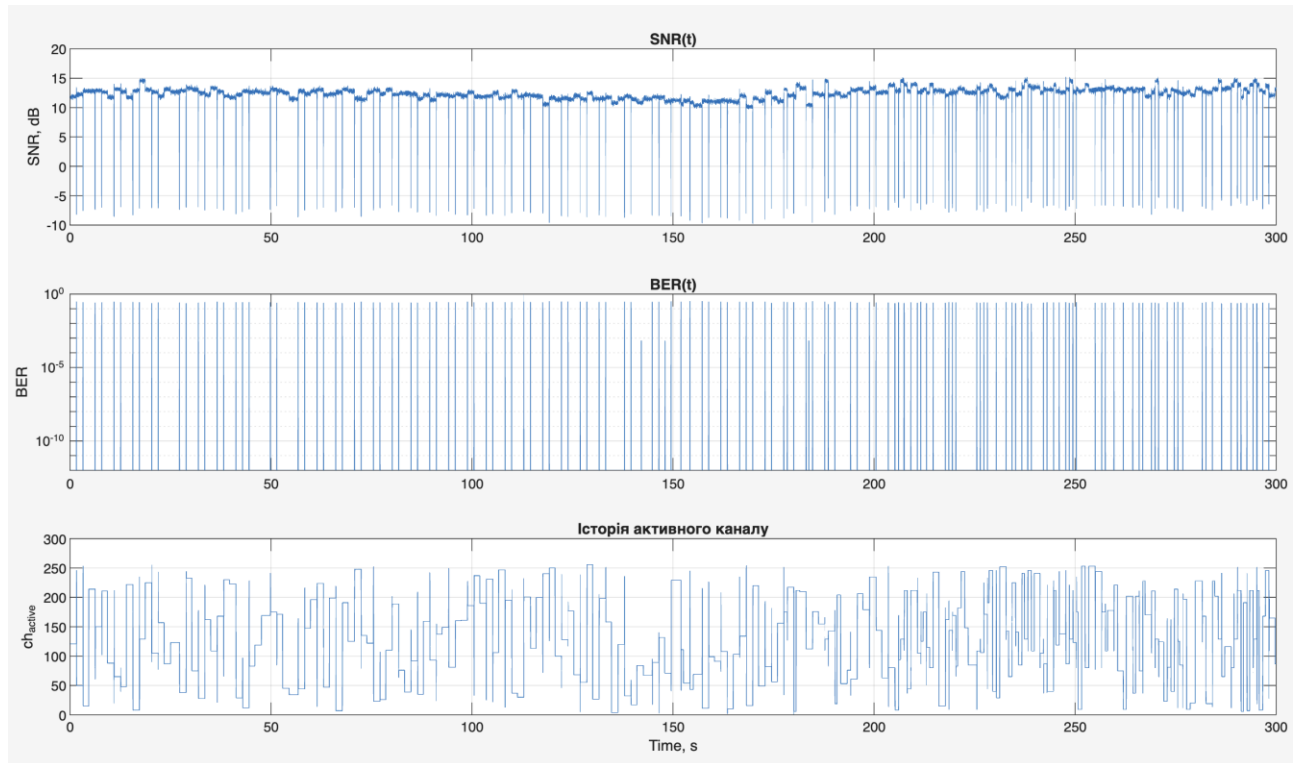


Рисунок 4.11 – Часова діаграма роботи адаптивної системи (час реагування на невідому частоту – 800 мс) на збільшеному часовому інтервалі

4.3 Обґрунтування вибору інтегрального BER для аналізу стійкості адаптивного каналу передачі даних

У процесі моделювання адаптивного каналу передачі даних в умовах дії навмисного завадового впливу використовуються різні показники якості зв'язку – миттєве співвідношення сигнал/шум (SNR), поточний коефіцієнт бітових помилок (BER), коефіцієнт цілісності кадрів (Pol), тощо. Однак у випадку, коли канал піддається періодичному пригніченню й відновленню, миттєві показники змінюються надзвичайно різко, що ускладнює оцінку загальної ефективності системи.

Саме тому для аналізу динаміки стійкості каналу доцільно використовувати *інтегральний BER*, який характеризує накопичену частку помилкових бітів за весь проміжок часу симуляції. Цей параметр визначається як:

$$BER_{int}(t) = \frac{\sum_{i=1}^t N_{err}(i)}{\sum_{i=1}^t N_{total}(i)},$$

де $N_{err}(i)$ – кількість помилкових бітів у кадрі, а $N_{total}(i)$ – загальна кількість переданих бітів у кадрі.

Інтегральний BER є усередненим показником, який не реагує на короточасні сплески *BER*, викликані моментами пригнічення. У системі, де канал постійно переходить між станами «добрий» і «поганий» (модель *bursty errors*), миттєвий *BER* коливається від майже нуля до одиниці, що робить його непридатним для оцінки загальної ефективності. *Інтегральний BER*, навпаки, відображає середню якість зв'язку, накопичену в часі, і дозволяє виявити повільні тенденції деградації системи – наприклад, поступове збільшення кількості відомих частот у пам'яті засобу пригнічення.

У реальному середовищі БпЛА зв'язок не є миттєвим процесом, а триває хвилини чи години. Саме інтегральний *BER* відображає, як система поводить себе на часовому інтервалі, достатньому для накопичення ефектів пригнічення. На графіку (рис. 4.12) видно, що інтегральний *BER* зростає повільно, з $\approx 4 \cdot 10^{-3}$ до $\approx 6 \cdot 10^{-3}$ протягом 600 секунд. Це зростання відображає фізичний процес «навчання» засобу пригнічення, коли з часом зменшується кількість повністю невідомих частот, а отже, частіше виникають короткі, але ефективні інтервали завадового пригнічення.

Інтегральний *BER* показує не моментальний стан каналу, а накопичену ефективність системи передачі. У той час як миттєвий *BER* може різко коливатися навіть у стабільно працюючій системі, інтегральний *BER* дозволяє:

- кількісно визначити частку втраченої інформації за весь період моделювання;
- оцінити вплив тривалого застосування засобів пригнічення на загальну надійність каналу;
- порівнювати різні алгоритми адаптації за єдиним інтегральним критерієм.

Для прикладу, якщо після 600 секунд інтегральний $BER = 0,0065$, це означає, що лише 0,65 % усіх бітів, переданих системою, були пошкоджені – тобто канал зберіг 99,35 % інформаційної цілісності, незважаючи на активну роботу засобів пригнічення.

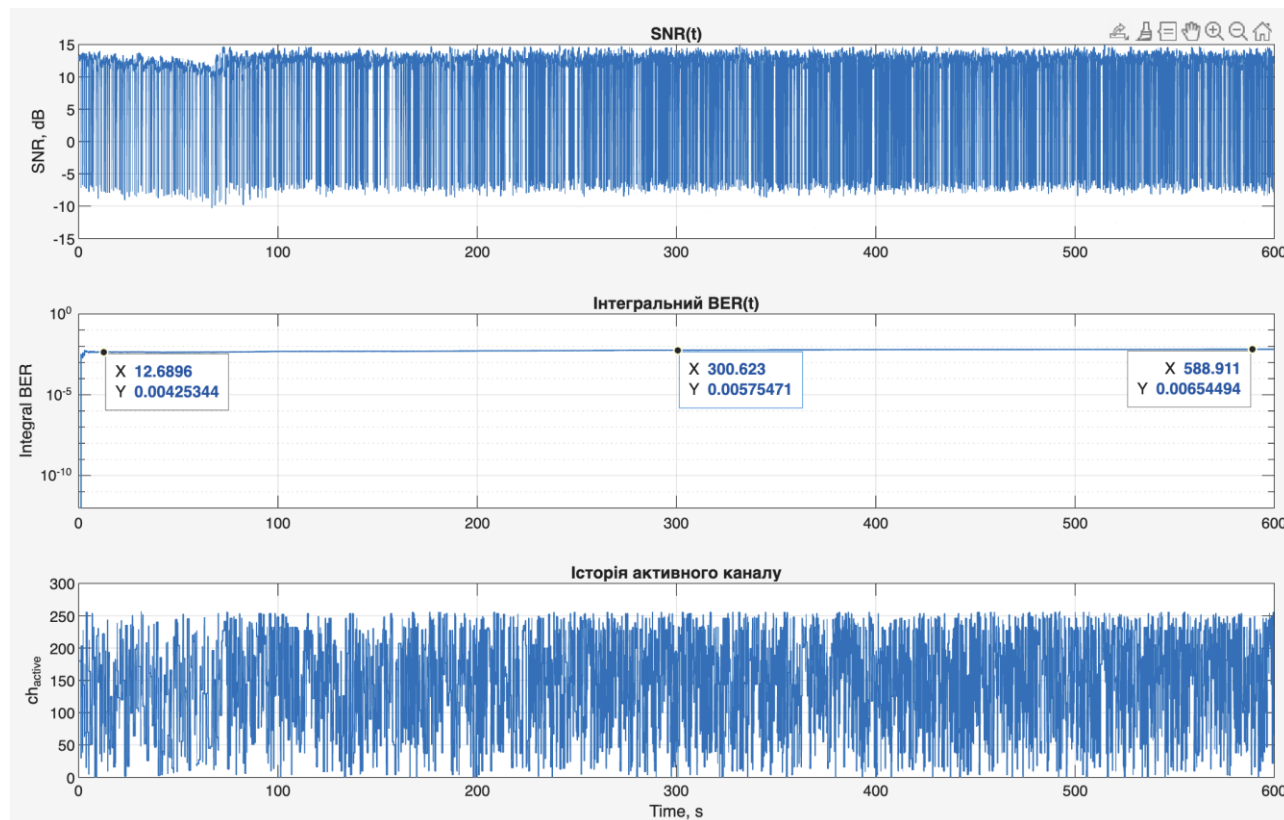


Рисунок 4.12 – Часова діаграма роботи адаптивної системи з графіком інтегрального BER

Використання інтегрального BER на графіку дозволяє візуально оцінити тенденцію погіршення каналу у часі. Якщо лінія $BER_{int}(t)$ зростає швидко – це свідчить про посилення впливу засобів пригнічення або зменшення кількості «вільних» частот. Якщо крива стабілізується – система вийшла на режим динамічної рівноваги: кількість нових атак компенсується адаптивними перемиканнями, і канал досягає квазістійкого стану. На цьому графіку видно, що після кількох сотень секунд крива зростає повільно – отже, система продовжує працювати навіть при зростанні інтенсивності атак.

Інтегральний BER безпосередньо пов'язаний з ймовірністю успішної передачі критичних команд:

- при $BER_{int} \leq 10^{-2}$ (1 %) система зберігає можливість стабільно передавати короткі пакети (64–256 біт);
- при $BER_{int} \leq 5 \cdot 10^{-3}$ канал придатний для передачі як команд управління, так і телеметрії;
- при $BER_{int} > 10^{-2}$ потрібно переходити до посиленого FEC або режиму реплікації повідомлень.

Таким чином, навіть повільне зростання інтегрального BER у досліджуваній моделі вказує на поступове зменшення спектрального ресурсу, але не на втрату керованості цільовою системою. Отже, інтегральний коефіцієнт бітових помилок $BER_{int}(t)$ було обрано основним параметром для аналізу стійкості адаптивного каналу керування цільовою системою, оскільки він відображає накопичену ефективність передачі в умовах переривчастого пригнічення та дозволяє об'єктивно оцінити здатність системи підтримувати керування навіть при поступовому зростанні інтенсивності атак засобів пригнічення.

4.4 Порівняння адаптивного та неадаптивного режимів

Розглянемо ще один, найбільш природний сценарій: спочатку безпроводний канал передачі даних працює в чистому середовищі, а потім (на 100-й секунді) цільова система входить у зону дії окопного засобу РЕБ, який починає випромінювати завади у своїх фіксованих смугах. На рисунку 4.13 модель чітко демонструє два етапи поведінки системи – до активації засобу пригнічення і після його увімкнення. Розберемо графіки послідовно.

1) Графіки $SNR(t)$

Ліворуч – Adaptive. До 100-ї секунди спостерігається стабільне відношення сигнал/шум (SNR) близько 12–15 дБ, що відповідає нормальній роботі бездротового каналу без завад. На 100-й секунді вмикається засіб пригнічення, і відбувається різке падіння SNR на поточній частоті (короткий імпульсний провал на графіку). Адаптивне ядро одразу фіксує погіршення, і система перестроюється на нову частоту, розташовану поза активною смугою завад.

Після перемикавання SNR відновлюється до попереднього рівня, і канал залишається стабільним до кінця симуляції. Це свідчить, що алгоритм успішно знайшов «чисте вікно» у спектрі.

Праворуч – Static (без перестроювання). До 100 с – така ж нормальна робота, але після увімкнення засобу пригнічення SNR різко падає приблизно до мінус 20 дБ і далі повільно деградує внаслідок поступового зближення цільової системи з джерелом завад. Оскільки частота не змінюється, система залишається в тій самій смузі, і рівень сигнал/шум продовжує погіршуватись, що призводить до повної втрати корисного сигналу.

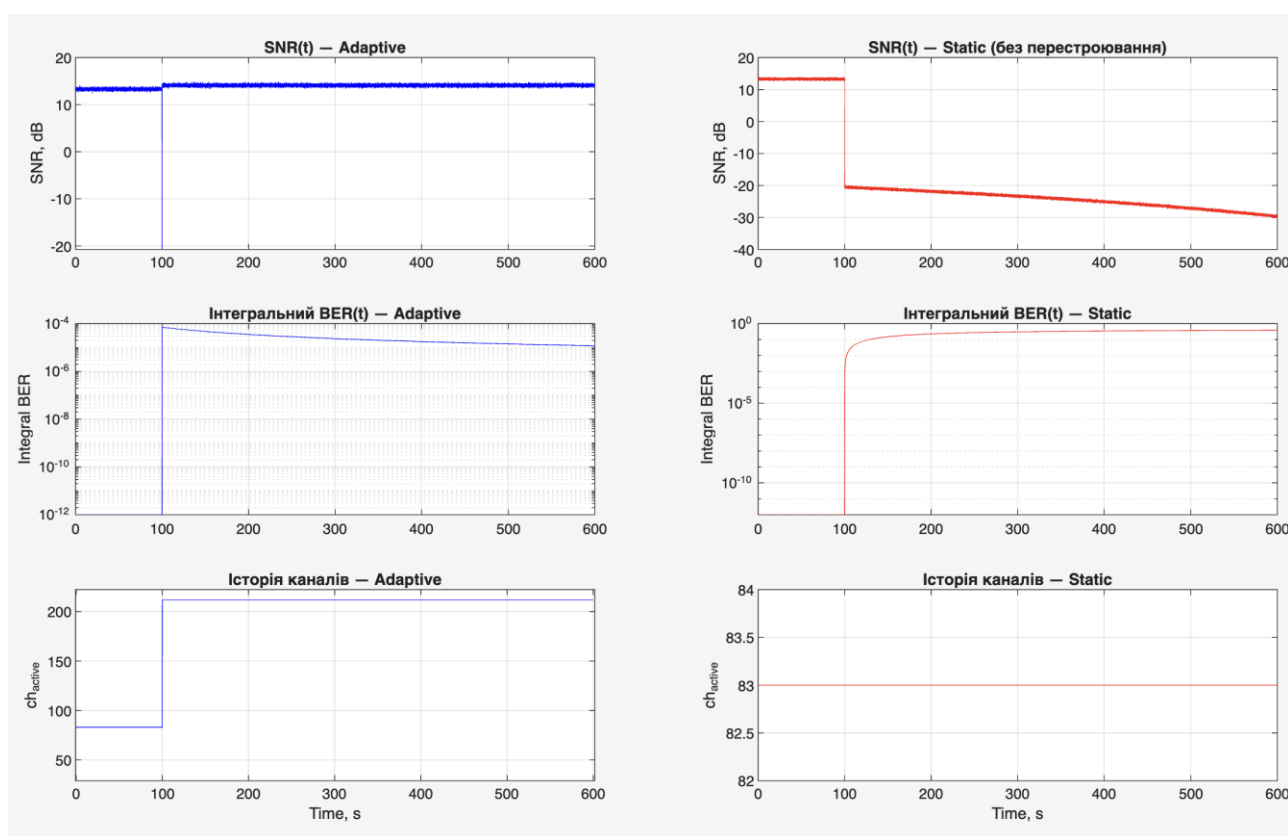


Рисунок 4.13 – Порівняння роботи адаптивної системи керування та каналу керування із фіксованим (статичним) вибором робочої частоти

2) Інтегральний $BER(t)$

Adaptive

На момент вмикання засобу пригнічення з'являється короткий сплеск BER , пов'язаний із деградацією кадрів під час дії завади, але після перемикавання інтегральний BER знову стабілізується на рівні $\sim 10^{-6}$ – 10^{-5} і навіть повільно

зменшується. Це означає, що після адаптації більшість переданих кадрів знову приймаються без помилок, і накопичений вплив завад залишається мінімальним.

Static

Інтегральний *BER* різко зростає майже до 0,5, тобто практично всі кадри після 100 с зіпсовані. Канал втрачає здатність передавати інформацію, і *BER* більше не зменшується – він насичується у стані «повної втрати зв'язку».

3) Історія активних каналів (ch_{active})

Adaptive

До 100 с – стабільний канал (горизонтальна лінія). На 100-й секунді видно ступінчастий перехід – це момент, коли адаптивне ядро перемкнулось на інший частотний слот. Після цього – знову горизонтальна лінія, тобто система втримує зв'язок на новому робочому каналі без потреби у подальших перестроюваннях. Фактично це демонструє успішне одноразове перемикання після виявлення завади.

Static

Канал не змінюється (рівна лінія), отже жодної реакції на появу засобу пригнічення не відбувається. Саме це пояснює катастрофічне зростання *BER* і падіння *SNR*.

4) Фізичний зміст отриманої динаміки

До 100-ї секунди цільова система працює у «чистому» ефірі. Після активації засобу пригнічення у фіксованих смугах (як на спектрограмі системи «Периметр») його приймач потрапляє під глушіння – потужність завад у смузі зростає, і *SNR* зменшується. Адаптивний варіант одразу аналізує деградацію спектра, розпізнає, що поточна частота заблокована, і за допомогою сканування переходить у найближче «вікно» між смугами. Статичний варіант не має такої здатності – тому після активації засобу пригнічення цільова система фактично повністю втрачає керування.

Отже, модель підтверджує, що адаптивний алгоритм частотного перестроювання забезпечує збереження працездатності каналу передачі даних навіть у разі раптового включення потужного засобу пригнічення. Саме така

поведінка є цільовим ефектом моделі – збереження керування системою в умовах раптового впливу потужних завад.

Наведений на рисунку 4.14 підсумковий графік – ілюстрація того, що розроблена імітаційна модель працює саме так, як задумано. Він відображає порівняння інтегрального коефіцієнта бітових помилок (*BER*) для двох режимів упродовж 600 секунд, коли на 100-й секунді вмикається окупний засіб РЕБ із фіксованими смугами випромінювання.

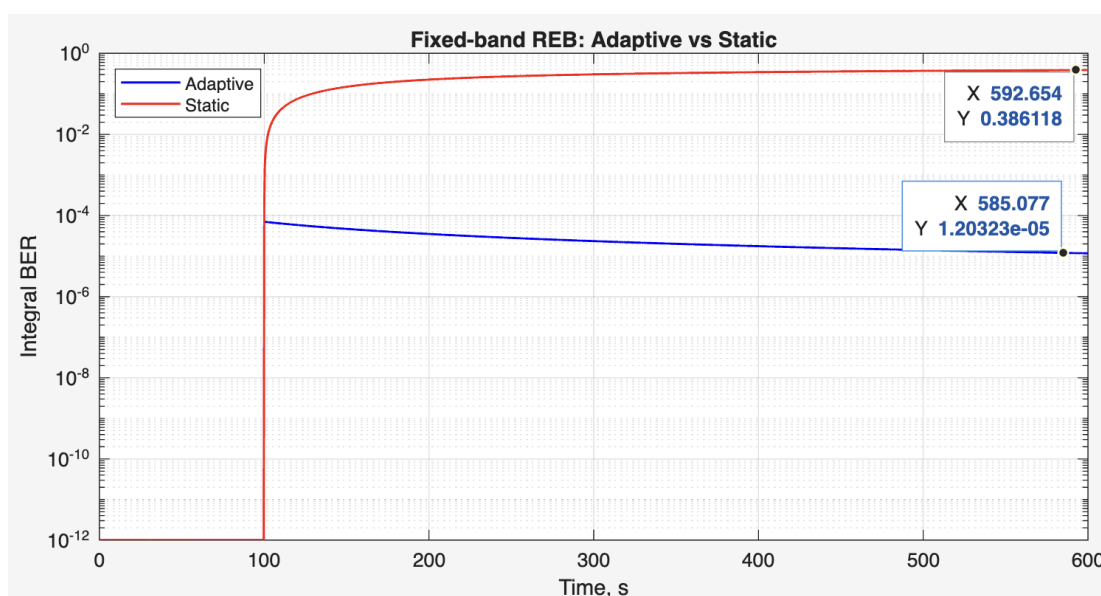


Рисунок 4.14 – Порівняння інтегрального *BER* адаптивного каналу керування та каналу керування із фіксованим (статичним) вибором робочої частоти

Синя крива – Adaptive

До 100 с: канал працює у «чистому» середовищі, інтегральний $BER \approx 10^{-11} - 10^{-12}$.

Після 100 с: на короткий час відбувається зростання помилок (короткий злам кривої), що відповідає моменту активації засобу пригнічення. Алгоритм виявляє різке падіння *SNR*, проводить сканування спектра, знаходить «чисте вікно» поза смугою завад і перемикається на іншу частоту. Після цього *BER* знову стабілізується на рівні близько 10^{-5} і навіть поступово зменшується завдяки накопиченню безпомилкових кадрів.

Червона крива – Static

До 100 с: якість каналу висока, $BER \rightarrow 0$.

На 100-й секунді засіб пригнічення починає випромінювати у смугу, де працює БПЛА. SNR різко падає до від'ємних значень ($-20 \dots -30$ дБ). Внаслідок цього миттєвий BER зростає майже до 0,5, тобто практично всі біти правильно розпізнати неможливо. Далі крива інтегрального BER дуже швидко насичується на рівні $\approx 0,38$ (≈ 38 % помилкових бітів у сумарному потоці). Це типова поведінка неадаптивного БПЛА, який залишився на зашумленій частоті: після вмикання засобу пригнічення зв'язок фактично зривається, і жодна інформація не може бути передана.

У ряді задач аналізу стійкості безпроводного каналу доцільно використовувати не лише інтегральний BER , а й ковзний (*sliding*) BER , обчислений у межах обмеженого вікна кадрів (рис. 4.15).

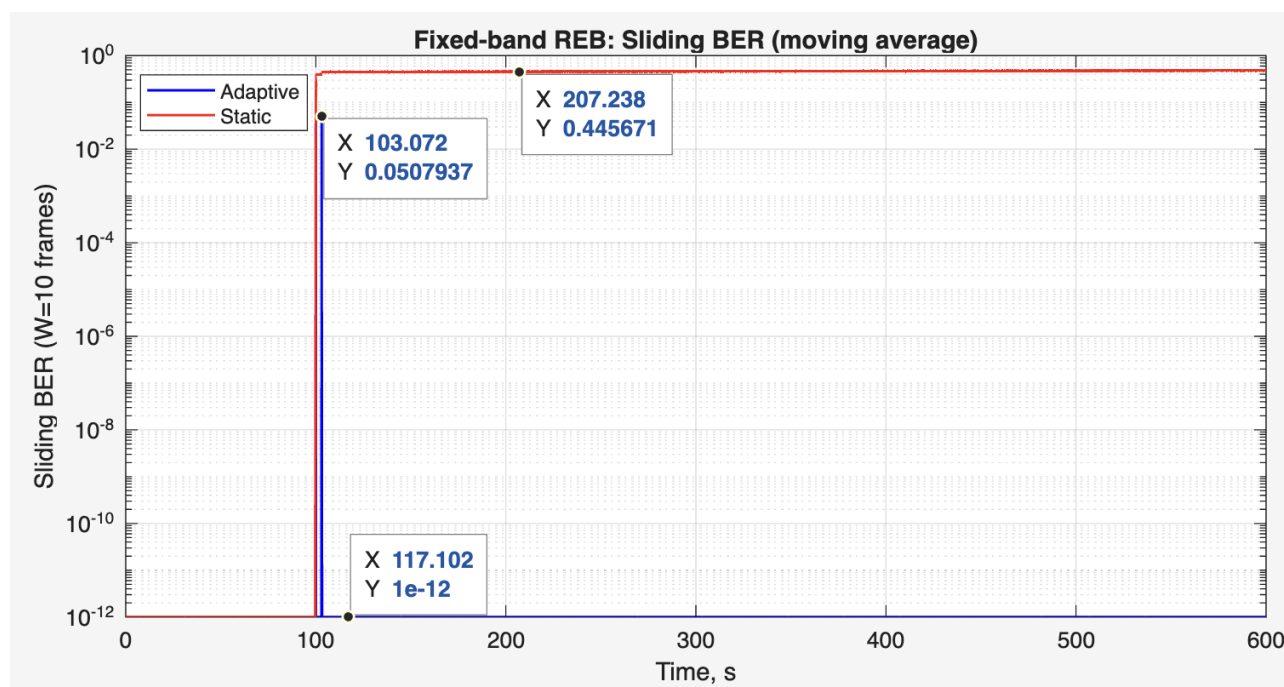


Рисунок 4.15 – Порівняння ковзного BER безпроводного каналу з адаптивною системою керування та каналу із фіксованим (статичним) вибором робочої частоти

Інтегральний BER характеризує накопичену частку помилок від початку сеансу зв'язку та є корисним для глобальної оцінки ефективності системи. Проте він має інерційний характер: після періоду високої якості зв'язку короткочасна

деградація може майже не вплинути на інтегральну оцінку, а після серйозної початкової деградації система може довго «нести історичний слід» помилок навіть після відновлення каналу.

Ковзний *BER*, натомість, відображає поточний стан каналу в межах обмеженого часового інтервалу (наприклад, $W = 10$ кадрів) і дозволяє:

- оперативно фіксувати момент входження цільової системи в зону дії засобу пригнічення;
- виявляти короточасні імпульсні або вузькосмугові завади;
- оцінювати ефективність перемикавання каналу в адаптивному режимі;
- формувати критерій спрацювання алгоритму керування з мінімальною затримкою.

Як видно з наведених графіків, інтегральний *BER* в адаптивному режимі може залишатися відносно підвищеним після відновлення зв'язку, оскільки він акумулює помилки, що виникли під час фази деградації каналу. Натомість ковзний *BER* оперативно відображає момент погіршення та подальшої стабілізації зв'язку. У статичному режимі ковзний *BER* швидко зростає до значень $0,1-0,5$, що свідчить про втрату працездатності каналу керування.

Таким чином, у задачах адаптивного керування параметрами каналу передачі даних ковзний *BER* є більш інформативним для прийняття оперативних рішень, тоді як інтегральний *BER* доцільно використовувати для підсумкової оцінки ефективності алгоритму в цілому.

Таблиця 4.1 – Ключові кількісні результати

Параметр	Adaptive	Static
Кінцевий інтегральний <i>BER</i>	1.2×10^{-5}	0.386
Відновлення каналу передачі даних після пригнічення	Так (за ≈ 0.2 с)	Ні
Кількість перестроювань каналу	1	0
Характер <i>SNR</i> після 100 с	стабільний ≈ 12 дБ	деградований ≈ -25 дБ
Стан керування цільовою системою	збережено	втрачено

Графіки (рис. 4.14 – 4.15) наочно демонструють перевагу адаптивного алгоритму частотного перестроювання при входженні цільової системи в зону дії засобу пригнічення із фіксованими смугами:

- адаптивна система утримує канал зв'язку та забезпечує інформаційну живучість навіть після появи потужних завад;
- статичний канал повністю втрачає працездатність уже через доли секунди після включення засобу пригнічення.

Іншими словами, ця симуляція чітко показує, що розроблений алгоритм дає перевагу у понад 4 порядки за точністю передачі ($BER \approx 10^{-5}$ проти $\approx 4 \times 10^{-1}$) у однакових умовах навмисного завадового впливу.

4.5 Кількісне обґрунтування впливу BER на цілісність кадру

Для формалізації впливу бітової помилки на цілісність керуючої інформації розглянемо зв'язок між імовірністю бітової помилки p_b та імовірністю коректного приймання кадру довжиною L біт [19; 100].

За припущення незалежності бітових помилок імовірність доставки кадру без помилок визначається як

$$PoI = (1 - p_b)^L,$$

де p_b – миттєве або ковзне значення BER ;

L – довжина кадру в бітах.

Відповідно, імовірність втрати кадру (Packet Error Rate) становить

$$PER = 1 - (1 - p_b)^L.$$

У межах розробленої моделі довжина кадру становить $L = 1540$ біт. Для характерних значень BER отримуємо:

- при $p_b = 10^{-1}$: $PoI \approx 10^{-71} \Rightarrow PER \approx 1$;
- при $p_b = 10^{-2}$: $PoI \approx 1,8 \cdot 10^{-7} \Rightarrow PER \approx 0,9999998$;
- при $p_b = 10^{-5}$: $PoI \approx 0,985$.

Звідси випливає, що навіть відносно невелике зростання BER до рівня 10^{-2} практично гарантує втрату кадру, тоді як забезпечення цілісності керуючих повідомлень з імовірністю не менше 0,99 потребує

$$p_b \lesssim 6,5 \times 10^{-6}.$$

Отже, перебування системи в області $BER \geq 10^{-2}$, що спостерігається у статичному режимі під час активного пригнічення, еквівалентне повній втраті функціональної придатності каналу керування.

В адаптивному режимі зростання ковзного BER обмежується інтервалом часу, необхідним для виявлення деградації та перемикання частоти. Після переходу на альтернативний канал система повертається в область малих значень BER (порядку 10^{-5} і нижче), що забезпечує статистично значуще підвищення імовірності збереження цілісності керуючих даних.

Таким чином, використання ковзного BER як оперативного індикатора стану каналу має безпосереднє математично обґрунтоване значення для забезпечення цілісності кадрів у безпроводному каналі керування цільовою системою в умовах навмисних завад.

Висновки за розділом 4

У розділі 4 вирішено задачу експериментального підтвердження ефективності розробленого методу адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних завад шляхом проведення серії обчислювальних експериментів на основі створеної імітаційної моделі.

За результатами моделювання встановлено:

1. Підтверджено адекватність імітаційної моделі каналу передачі даних.

Отримані залежності BER від E_b/N_0 узгоджуються з відомими теоретичними характеристиками застосування QPSK у каналі AWGN. Модель коректно відтворює процес входження у синхронізм, вплив частотного зсуву та деградацію якості зв'язку при зниженні енергетичного співвідношення.

2. Кількісно оцінено вплив апаратних факторів на часові характеристики каналу. Показано, що параметр `FrequencyOffset` є визначальним для часу відновлення синхронізації. Використання стабілізованого джерела тактової частоти (GPSDO-TCXO) забезпечує входження у синхронізм у межах одного кадру тривалістю ≈ 23 мс, що формує гарантоване часове вікно передачі до моменту реакції засобу пригнічення.

3. Проведено порівняльний аналіз функціонування каналу передачі даних в різних сценаріях навмисних завадових впливів. Досліджено режими швидкого переналаштування засобу пригнічення, сценарій із повторним ураженням попередніх частот та сценарій фіксованосмугового глушіння. Встановлено, що у статичному режимі канал втрачає працездатність після входження в зону дії завад, тоді як запропонований адаптивний метод забезпечує збереження зв'язку за рахунок своєчасного виявлення деградації та частотного перестроювання. Показано, що характер часової динаміки *BER* та *SNR* суттєво залежить від типу завадового сценарію, що підтверджує необхідність адаптивного керування параметрами каналу передачі даних.

4. Обґрунтовано систему показників оцінювання стійкості каналу передачі даних. Показано доцільність використання інтегрального *BER* як глобального критерію довготривалої ефективності та ковзного *BER* як оперативного індикатора деградації. Встановлено, що перевищення $BER \geq 10^{-2}$ призводить до практично повної втрати кадру довжиною 1540 біт, що безпосередньо означає порушення цілісності даних у безпроводному каналі.

5. Експериментально підтверджено перевагу запропонованого адаптивного алгоритму. У режимі адаптивного керування отримано кінцеве значення інтегральної ймовірності бітової помилки $BER \approx 10^{-5}$, тоді як у статичному режимі $BER \approx 0,38$, що відповідає практичній втраті функціональної придатності каналу передачі даних. Таким чином, застосування адаптивного алгоритму забезпечує зменшення *BER* на 4–5 порядків та збереження керованості цільовою системою в умовах активного навмисного завадового впливу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання комп'ютерних наук, що полягає у розробленні методів і моделей забезпечення цілісності даних у безпроводних системах передачі інформації на основі адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах динамічної зміни параметрів середовища та дії навмисних дестабілізуючих впливів, а також у їх експериментальній перевірці засобами комп'ютерного імітаційного моделювання.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у такому.

1. Проведено системний аналіз сучасних підходів до побудови безпроводних систем передачі даних як складних динамічних систем оброблення інформації, що функціонують в умовах нестаціонарного завадового середовища, з урахуванням концепцій когнітивного та програмно-визначеного радіо, з метою формалізації вимог до математичних моделей, алгоритмів адаптивного керування та процедур прийняття рішень щодо параметрів каналів передачі даних. Виконано формалізацію каналу передачі даних як нелінійної динамічної системи з керуванням і збуреннями, що дозволило узагальнити підхід до опису інформаційних процесів передачі даних у нестаціонарному середовищі та створити модельну основу для синтезу адаптивних алгоритмів.

2. Уперше розроблено узагальнену імітаційну модель каналу передачі даних, яка, на відміну від відомих, забезпечує моделювання процесів передавання даних в умовах навмисних впливів шляхом інтеграції параметризованих моделей каналу, середовища та дестабілізуючих впливів, описаних сценаріями функціонування, у межах єдиної формалізованої структури, що дозволило реалізувати сценарно-орієнтоване моделювання функціонування каналу та обґрунтувати вибір адаптивних стратегій керування.

3. Уперше розроблено метод адаптивного керування параметрами каналу передачі даних в умовах навмисних дестабілізуючих впливів, який, на відміну від відомих, що базуються на статичних правилах або миттєвих енергетичних показниках каналу, забезпечує прийняття рішень шляхом комплексного

врахування апріорної інформації про множину допустимих каналів, поточного стану каналу за метриками цілісності даних, часової динаміки функціонування системи та історії попередніх станів каналів із використанням механізму їх тимчасового блокування, що дозволило підвищити обґрунтованість вибору робочого каналу, зменшити ймовірність повторного використання непридатних частот і забезпечити цілісність даних у процесі передачі в умовах динамічного завадового середовища.

4. Удосконалено модельно-алгоритмічний підхід до адаптивного керування параметрами передачі даних, який, на відміну від відомих, що базуються на аналізі лише поточних значень параметрів каналу, ґрунтується на інтегрованому використанні обчислювальної моделі каналу, метрик цілісності даних та часової динаміки й історії змін характеристик каналу шляхом реалізації багатокритеріального оцінювання його стану, що дозволило виявляти тенденції деградації каналу, зменшувати втрати інформації у перехідних режимах і підвищити ефективність передачі даних з точки зору їх цілісності.

5. Обґрунтовано систему показників оцінювання цілісності даних і ефективності передачі інформації, зокрема на основі використання BER, PER та інтегральних і ковзних метрик, придатних для аналізу функціонування системи в умовах динамічної завадової обстановки та забезпечення адаптивного керування параметрами каналу передачі даних, набув подальшого розвитку метод моделювання та оцінювання ефективності функціонування безпроводних систем передачі даних в умовах завадового впливу, який, на відміну від існуючих підходів, розширено за рахунок використання сценарного моделювання завад та системи інтегральних і ковзних метрик стану системи (BER, PER, SNR, PoI), що забезпечує можливість кількісного порівняння ефективності алгоритмів адаптивного керування параметрами каналу передачі даних та вибору найбільш ефективної стратегії функціонування системи для заданого сценарію завадового впливу.

6. Проведено обчислювальні експерименти, у межах яких підтверджено адекватність розробленої імітаційної моделі та ефективність запропонованого

методу адаптивного керування параметрами каналу передачі даних. Кількісні результати свідчать про суттєве зниження рівня бітових помилок, зменшення втрат інформації та забезпечення збереження цілісності даних, зокрема у перехідних режимах функціонування, що виникають під час зміни параметрів каналу передачі даних та дії дестабілізуючих впливів.

Отримані результати мають теоретичне значення для розвитку методів комп'ютерного моделювання інформаційних процесів у безпроводних системах передачі даних та методів адаптивного керування в умовах невизначеності середовища. Практичне значення полягає у можливості застосування розроблених моделей, методів і алгоритмів при створенні програмно-апаратних систем передачі даних із підвищеними вимогами до цілісності інформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бескрестнов С. Комплекс моніторингу БПЛА РФ. Самостійне виготовлення та експлуатація. Київ, 2024. 18 с.
2. Бирик Р. Т., Опіський І. Р. Електромагнітні загрози в сучасних конфліктах: аналіз характеристик джерел РЕБ та їх вплив на ефективність систем ураження // Інформаційна безпека. 2025. № 3 (27). С. 194–204. DOI: 10.28925/2663-4023.2025.27.748.
3. Білик О., Мартинчук О., Жуга Ю. Дослідження застосування SDR HackRF для виявлення радіочастотної активності БПЛА // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2025. Т. 5, № 2. С. 95–108.
4. Бойко Ю. М. Способи підвищення завадостійкості оброблення сигналів з фазовою маніпуляцією у цифрових супутникових каналах передавання інформації // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2012. № 6. С. 144–156.
5. Вадіс Д. А., Аврутов В. В. Методи підвищення функціональної ефективності БПЛА // Механіка гіроскопічних систем. 2024. № 48. DOI: 10.20535/0203-3771482024317891.
6. Василенко В. М. Засоби адаптивного управління системою передачі інформації в умовах апріорної невизначеності : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 – інформаційні технології. Київ : Ін-т телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, 2018. 190 с.
7. Волков А. Ф., Лезік О. В., Корсунов С. І., Левагін Г. А., Яновський О. В., Івахненко К. В. Аналіз застосування БПЛА у вірмено-азербайджанському воєнному конфлікті та можливі шляхи боротьби з ними // Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 4 (64). С. 7–17. DOI: 10.30748/soivt.2020.64.01.
8. Волочій Б., Онищенко В., Озірковський Л. Програмна аналітична стохастична модель експлуатаційної функційної поведінки радіоелектронного комплексу виявлення БПЛА // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2023. Т. 3, № 2. С. 126–149.

9. В Україні з'явилася нова зброя проти вибухових дронів ЗС РФ: як вона працює. ФОКУС. URL: <https://focus.ua/uk/digital/577046-v-ukrayini-zyavilasya-nova-zbroya-proti-vibuhovih-droniv-zs-rf-yak-vona-pracyuye> (дата звернення: 26.11.2023).

10. Горбатий І. В., Климаш М. М. Дослідження й оптимізація модуляції сигналу засобами математичного моделювання // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2010. № 680. С. 217–224.

11. Горлинський Б. В., Зайцев С. В., Казнадій С. П., Зайцева Л. І. Формалізація процесу математичного моделювання адаптивної зміни структури кодів в безпроводових засобах передачі даних // Екологічна безпека та природокористування. 2019. Вип. 3 (31). С. 64–78.

12. Горлинський Б. В., Зайцев С. В. Метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних // Математичне моделювання в економіці. 2019. № 4. С. 5–15.

13. Горлинський Б. В. Методи забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних за рахунок адаптивного кодування : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 – інформаційні технології. Київ : Ін-т телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, 2020. 205 с.

14. Гурський Т. Г., Жук О. Г., Клімович С. О. Напрямки застосування псевдовипадкових послідовностей в радіомережах спеціального призначення // Вісник Хмельницького національного університету. 2012. № 6. С. 160–167.

15. Гурський Т. Г., Кривенко О. В. Методика формування сигналу в радіозасобах з ППРЧ при передачі мови в умовах впливу завад у відповідь // Системи управління, навігації та зв'язку. 2017. Вип. 2 (42). С. 179–184.

16. Дудар О., Мішан В., Горященко К. Моделювання сигналів QPSK в середовищі Simulink // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. Т. 2, № 5 (327). С. 167–172. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-327-5-167-172.

17. Захист каналів зв'язку від впливу РЕБ. URL: https://sprotyvg7.com.ua/wpcontent/uploads/2024/02/Захист_каналів_зв'язку_від_впливу_РЕБ.pdf (дата звернення: 20.02.2025).

18. Зайцев С., Башинська О., Камак Ю., Горлинський Б. Дослідження методів підвищення достовірності інформації сучасних безпілотних авіаційних комплексів // Технічні науки та технології. 2016. № 4 (6). С. 97–106.

19. Зайцев С. В., Казимир В. В., Яриловець А. В., Ткач Ю. М., Грохольський Я. М., Лівенцев С. П., Романенко В. П. Теоретичні основи побудови систем передачі інформації : монографія. Чернігів : ЧНТУ, 2017. 385 с.

20. Зайцев С. В., Василенко В. М., Семендяй С. М. Огляд адаптивних методів забезпечення достовірності передачі інформації при використанні завадостійкого кодування у системах бездротового зв'язку // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 278–286. DOI: 10.15276/imms.v11.no4.278.

21. Знищує небезпечні БПЛА «Ланцет»: українець розробив нову антидронову рушницю (фото). ФОКУС. URL: <https://focus.ua/uk/digital/576379-znishuye-nebezpechni-bpla-lancet-ukrayinec-rozrobiv-novu-antidronovu-rushnicyu-foto> (дата звернення: 26.11.2023).

22. Іохов О. Ю., Кузьминич І. В., Малюк В. Г., Сєверінов О. В. Оцінювання завадостійкості каналу радіозв'язку тактичної ланки методом імітаційного моделювання // Системи управління, навігації та зв'язку. 2013. Вип. 3. С. 179–185. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2013_3_35 (дата звернення: 20.02.2025).

23. Іохов О. Ю., Малюк В. Г., Горбов О. М. Імітаційне моделювання захищених радіоканалів військового призначення // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2015. № 1. С. 92–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2015_1_22 (дата звернення: 20.02.2025).

24. Казіміров О. О. та ін. Проблемні питання застосування засобів радіоелектронної боротьби проти безпілотних літальних апаратів // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2025. № 1 (83). С. 33–39. DOI: 10.30748/zhups.2025.83.04.

25. Корсунов С. І., Волков А. Ф., Оборонов М. І., Орехов С. В., Гуртовенко В. В., Федченко С. І. Трансформація завдань безпілотної авіації: від створення до застосування у воєнних конфліктах сучасності // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 3 (44). С. 66–81. DOI: 10.30748/nitps.2021.44.08.

26. Корчинський В. В., Назаренко О. А., Степанов В. О., Аль-Файюмі Х. Методи підвищення прихованості передавання інформації на основі розширення спектра таймерних сигналів // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2022. № 2 (04). С. 26–32. DOI: 10.36994/2788-5518-2022-02-04-02.

27. Костиця О. О., Гризо А. А., Федоров А. В., Романов Ю. М. Досвід створення імітаторів перешкодової обстановки для тренування операторів радіолокаційних станцій метрового та дециметрового діапазонів хвиль // Системи озброєння і військова техніка. 2022. № 2 (70). С. 46–55. DOI: 10.30748/soivt.2022.70.06.

28. Красуха-4. Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Красуха-4> (дата звернення: 15.08.2023).

29. Крючкова Л., Ворохоб Н. Адаптивні методи протидії активним шумовим завадам // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 2 (30). С. 455–472. DOI: 10.28925/2663-4023.2025.30.987.

30. Кутень Р., Ахмедова А. Підвищення рівня захищеності та життєздатності безпілотних авіаційних пристроїв // Безпека інформації. 2024. Т. 30, № 1. С. 88–94. DOI: 10.18372/2225-5036.30.18609.

31. Кутень Р. Застосування частотного переналаштування для захисту безпілотних літальних апаратів // Social Development and Security. 2024. Vol. 14, No. 2. Р. 64–73. DOI: 10.33445/sds.2024.14.2.7.

32. Кутень Р. Б., Синявський О. Ю. Методи і засоби забезпечення стабільності та захисту радіозв'язку в умовах складної електромагнітної обстановки // Комп'ютерні системи та мережі. 2024. № 1 (6). С. 99–107. DOI: 10.23939/csn2024.01.099.

33. Кутень Р. Б. Покращення захисту інформації при передачі бездротовими системами : дис. ... д-ра філософії : 125 – кібербезпека. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2024. 188 с.

34. Лаврут О. О., Лаврут Т. В., Климович О. К., Здоренко Ю. М. Новітні технології та засоби зв'язку у Збройних Силах України: шлях трансформації та перспективи розвитку // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2019. № 1 (34). С. 91–101. DOI: 10.30748/nitps.2019.34.13.

35. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у MATLAB : електронний навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 421 с.

36. Лаптев О. А., Марченко В. В. Застосування завад для захисту інформації від витоку радіоканалом // Сучасний захист інформації. 2025. № 1 (61). С. 89–97.

37. Липський О. А. Вибір параметрів сигналу в засобах радіорелейного зв'язку при впливі навмисних завад : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Київ : Держ. ун-т інформаційно-комунікаційних технологій, 2011. 151 с.

38. Лисечко В. П., Сопронюк І. І., Степаненко Ю. О., Брюзгіна Н. О. Дослідження методів аналізу спектру в когнітивних радіомережах // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2010. Вип. 3 (25). С. 137–145.

39. Мартовицький В. О., Шеховцов О. В., Алейник Д. С., Пахомова Є. В., Іванченко Д. І. Підхід до виявлення та класифікації радіокерованих моделей за їх радіосигналом // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025. № 2 (93), ч. 2. С. 228–236. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.2.2.27.

40. Масесов М. О., Панченко І. В., Бондаренко Л. О., Малих В. В. Рекомендації щодо впровадження стандарту безпроводового зв'язку IEEE 802.22 у системах радіозв'язку спеціального призначення // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». 2013. Вип. 1. С. 47–53. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpviti_2013_1_8 (дата звернення: 20.02.2025).

41. Музиченко А. О., Дунець Р. Б. Вибір та реалізація методів навігації для безпілотних літальних апаратів на сучасних комп'ютерних компонентах // *Computer Systems and Networks*. 2024. Vol. 6, No. 2. P. 158–170. DOI: 10.23939/csn2024.02.158.

42. Муравйов О. В., Довбиш І. О., Галаган Р. М., Богдан Г. А., Момот А. С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 2. С. 199–205. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.1/32.

43. Назаренко О. К., Ушкаренко О. О., Дьяконов О. С., Сірівчук А. С., Обрубов А. В. Програмна реалізація MAVLink-телеметрії для безпілотних авіаційних систем на базі контролерів Pixhawk // *Методи та прилади контролю якості*. 2025. № 2 (55). С. 190–201. DOI: 10.31471/1993-9981-2025-2(55)-190-201.

44. Нижник А., Партика А. І. Розробка концепції системи виявлення та знешкодження БПЛА з використанням дронів-перехоплювачів // *Computer Systems and Networks*. 2025. Вип. 7, № 1. С. 235–246. DOI: 10.23939/csn2025.01.235.

45. Обіход Я. Я., Лисечко В. П., Фоменко О. К. Метод навчання когнітивних радіомереж на основі кіл Маркова // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків : УкрДАЗТ, 2012. Вип. 133. С. 147–154.

46. Обіход Я. С., Лисечко В. П., Прогонний О. М., Качуровський Г. М., Сколота С. В. Розробка методу вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних та вторинних користувачів з використанням технології «Energy harvesting» під керуванням нейронної мережі // *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. Вип. 3 (49). С. 165–173. DOI: 10.26906/SUNZ.2018.3.165.

47. Обіход Я. Я. Методи керування інтелектуальних телекомунікаційних мереж : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.02. Харків : Укр. держ. ун-т залізничного транспорту, 2019. 182 с.

48. Олексенко О. О., Авраменко О. В., Федоров А. В., Сніцаренко В. В., Чернавіна О. Є. Застосування безпілотних літальних апаратів збройними силами Російської Федерації у війні проти України // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 4 (49). С. 37–42. DOI: 10.30748/nitps.2022.49.05.

49. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції : метод. рек. / А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ : Нац. акад. внутр. справ, 2022. 72 с.

50. Павлюк В. В. Побудова автоматичного квазідоплерівського радіопеленгатора за технологією програмно визначеного радіо // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2017. № 1 (79). С. 87–95.

51. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. 2-ге вид., перероб. Київ : Либідь, 2007. 656 с.

52. Р-330Ж «Житель». Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Р-330Ж_«Житель» (дата звернення: 15.08.2023).

53. Репеллент-1. Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Репеллент-1> (дата звернення: 15.08.2023).

54. Сайко В. Г., Комаров В. О., Гетьман А. В., Мусієнко В. А., Колодійчук Л. В., Станілога О. О. Модель оцінки структури цільового сигналу виявлення частотних каналів у когнітивних радіомережах спеціального призначення // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 36 (75), № 2. С. 139–148. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.2.1/21.

55. Самойленко О. В., Глущенко П. А., Волотівський П. Б. Завдання та обрис алгоритмів штучного інтелекту в системах бортового обладнання перспективних безпілотних авіаційних комплексів. Київ : ДНДІ авіації, 2023.

56. Семендй С. М., Зайцев С. В. Метод забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних за рахунок структурної адаптації та використання нейронних мереж // Безпека ресурсів інформаційних систем : матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 16–17 квіт. 2020 р.). Чернігів : ЧНТУ, 2020. С. 182–185.

57. Семендяй С. М. Використання технології когнітивного радіо для підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2023. № 4 (20). С. 220–229. DOI: 10.28925/2663-4023.2023.20.220229.

58. Семендяй С. М. Підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби // Технічні науки та технології. 2023. № 2 (32). С. 224–234. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-224-234.

59. Семендяй С. М. Адаптивний метод вибору каналу зв'язку для застосування в БпЛА // Інформаційні технології у житті студентів та молодих науковців Закарпаття : матеріали VII регіональної наук.-практ. конф. (Ужгород, 30 листоп. 2023 р.). Ужгород : УжНУ, 2023. С. 189–192.

60. Семендяй С. М. Адаптивне спектральне маневрування в системах керування роботизованими комплексами в умовах радіоелектронної боротьби // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 2 (30). С. 616–629. DOI: 10.28925/2663-4023.2025.30.937.

61. Семендяй С. М. Кіберзахист автономних логістичних систем на базі БпЛА: поточні виклики та прогнози // Юність науки – 2025 : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів 23–25 квіт. 2025 р.). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. С. 1136–1137.

62. Семендяй С. М. Протидія засобам радіоелектронної боротьби у логістичних безпілотних апаратах шляхом застосування когнітивного радіо // ITSec: Безпека інформаційних технологій : матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Тернопіль, 22–24 трав. 2025 р.). Київ : ДУІКТ, 2025. С. 171–173.

63. Сокоринська Н. В. Інформаційна технологія підвищення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних з адаптивними кодами : дис. ... д-ра філософії : 122 – комп'ютерні науки. Чернігів : Нац. ун-т «Чернігівська політехніка», 2025. 147 с.

64. Сучасне озброєння і військова техніка збройних сил Російської Федерації : довідник учасника ООС / С. П. Корнійчук та ін. ; за заг. ред. С. П. Корнійчука. Харків : ДІСА ПЛЮС, 2020. 1220 с.

65. Фабіровський С., Сторож В., Прудис І., Герей І. Побудова малогабаритних пристроїв для радіоелектронного подавлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2022. Т. 2, № 1. С. 82–95. DOI: 10.23939/ictee2022.01.082.

66. Францевич О. М. Математичні моделі адаптивного радіоканалу зв'язку з системами регулювання потужності передавача на базі нечіткої логіки : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. Київ : Держ. ун-т інформ.-комунікац. технологій, 2005. 140 с.

67. Шевцов П. В., Щербина В. О., Гайдамака В. О., Куринський В. В. Використання та перспективи мереж безпроводового зв'язку // Наукові записки УНДІЗ. 2018. № 3 (51). С. 44–50.

68. Шипшина-АЕРО. Вікіпедія : вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Шипшина-АЕРО> (дата звернення: 15.08.2023).

69. Шолохов С. М., Самборський І. І., Вакуленко О. В., Ніколаєнко Б. А. Завадозахист радіоелектронних засобів. Частина 1. Основи завадозахисту систем зв'язку : навч. посіб. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 210 с.

70. Янишин В. Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2018. 158 с.

71. Abdulzahra S., Al-Qurabat A. Exploring radio frequency-based UAV localization techniques: a comprehensive review // International Journal of Computing and Digital Systems. 2024. Vol. 15. P. 1565–1581. DOI: 10.12785/ijcds/1501111.

72. Adamy D. EW 104: electronic warfare against a new generation of threats. Boston : Artech House, 2015.

73. Adaptive RF Technologies (ART). DARPA. URL: <https://www.darpa.mil/research/programs/adaptive-rf-technologies> (date of access: 28.01.2024).

74. Arslan H., Arslan Y. Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems. New York : Springer, 2007. 327 p.

75. Awe O. O. Spectrum sensing for dynamic spectrum access in cognitive radio : licentiate thesis. Västerås : Mälardalen University, 2015. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1511883/FULLTEXT01.pdf> (date of access: 20.02.2026).

76. Banerjee S., Karmakar K. A comparative study on cognitive radio implementation issues // International Journal of Computer Applications. 2012. Vol. 45, No. 15. P. 44–51. DOI: 10.5120/6858-9477.

77. Board-mounted GPSDO (TCXO). Ettus Research. URL: <https://www.ettus.com/all-products/gpsdo-tcxo-module/> (date of access: 16.02.2025).

78. Bybyk R. T., Nakonechnyi Y. M. Research on the impact of electromagnetic interference on the functioning of communication and radar systems // Computer Systems and Networks. 2024. Vol. 6, No. 1. P. 1–14. DOI: 10.23939/csn2024.01.001.

79. COGINT. Analytic insight report: Russian EW systems. 2023. 19 p.

80. Cognitive radio techniques: spectrum sensing, interference mitigation and localization / ed. by H. Arslan. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2010. 528 p.

81. Drone jammer “ANTIDRON KVSG-6”. Kvertus Technology. URL: <https://www.kvertus.com/products/drone-jammer-kvs-antidron-sg-6/> (date of access: 15.08.2023).

82. Flak P. Drone detection sensor with continuous 2.4 GHz ISM band coverage based on cost-effective SDR platform // IEEE Access. 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3104738.

83. Gallager R. G. Information theory and reliable communication. New York : Wiley, 1968. 720 p.

84. Haykin S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2005. Vol. 23, No. 2. P. 201–220. DOI: 10.1109/JSAC.2004.839380.

85. IEEE Std 802.22-2011. Wireless Regional Area Networks (WRAN) – Cognitive Radio Based Systems. IEEE, 2011.
86. Khalil H. K. Nonlinear systems. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 750 p.
87. Michel A. H. Counter-drone systems. 2nd ed. 2019. URL: <https://www.calameo.com/read/000009779458ad0134023> (date of access: 15.08.2023).
88. Mitola J. Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio : PhD dissertation. Stockholm : Royal Institute of Technology (KTH), 1999. URL: <https://scispace.com/pdf/cognitive-radio-an-integrated-agent-architecture-for-1v855bviue.pdf> (date of access: 20.02.2025).
89. Morelos-Zaragoza R. The art of error correcting coding. New York : John Wiley & Sons, 2002. 221 p.
90. Negi S. Cognitive radio. URL: <https://www.scribd.com/doc/103610191/Cognitive-Radio> (date of access: 28.01.2025).
91. Obikhod Y. Y., Lysechko V., Sverhunova Y., Zhuchenko O., Progonniy O., Kachurovskiy G., Tretjak V., Malyuga V., Voinov V. Improvement of the cognitive radio system area management method using neural networks // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4/9 (88). P. 22–29.
92. Opirskyy I., Bybyk R. Research on modern methods of electronic warfare and methods and means of its counteraction // Ukrainian Scientific Journal of Information Security. 2023. Vol. 29, No. 2. P. 88–97.
93. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24, No. 2. P. 767–809. DOI: 10.1109/COMST.2022.3159185.
94. Podorozhniak A., Volotskov Y., Shevtsova O. Drone's control system research // Advanced Information Systems. 2018. Vol. 2, No. 3. P. 97–101. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.16.

95. Poisel R. A. Modern communications jamming principles and techniques. Norwood : Artech House, 2004. 846 p.
96. Pu D., Wyglinski A. M. Digital communication systems engineering with software-defined radio. Boston : Artech House, 2013.
97. QPSK transmitter and receiver. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/qpsk-transmitter-and-receiver.html> (date of access: 03.07.2024).
98. Saeed R. A., Ismail A. F., Hasan M. K., Mokhtar R., Salih S. K. A., Hashim W. Throughput enhancement for WLAN TV white space in coexistence of IEEE 802.22 // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8, No. 11. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i11/71783.
99. Semendiai S., Tkach Y., Shelest M., Korchenko O., Ziubina R., Veselska O. Improving the efficiency of UAV communication channels in the context of electronic warfare // International Journal of Electronics and Telecommunications. 2023. Vol. 69, No. 4. P. 727–732. DOI: 10.24425/ijet.2023.147694.
100. Sklar B. Digital communications: fundamentals and applications. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001. 1100 p.
101. U.S. Department of Defense. Electromagnetic spectrum superiority strategy. Washington, DC, 2020. URL: https://media.defense.gov/2020/Oct/29/2002525927/-1/-1/0/electromagnetic_spectrum_superiority_strategy.pdf (date of access: 27.01.2025).
102. Valieva I. Spectrum sensing for dynamic spectrum access in cognitive radio : licentiate thesis. Eskilstuna ; Västerås : Mälardalens högskola, 2021. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1511883/FULLTEXT01.pdf> (date of access: 20.02.2025).
103. Valieva I. Spectrum sensing for cognitive radio : doctoral dissertation. Västerås : Mälardalen University Press, 2023. 373 p. ISBN 978-91-7485-583-8. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1736525> (date of access: 20.02.2025).

104. Xin C., Song M. Spectrum sharing for wireless communications. Cham : Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-13803-9_1.
105. Yang B., Yang E. A survey on radio frequency based precise localisation technology for UAV in GPS-denied environment // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2021. Vol. 103. P. 1–30.
106. Zhang Y., Xu Y., Chen H., Zhao N., Ding Z. Anti-jamming communications for UAV-enabled wireless networks: a survey // Ad Hoc Networks. 2021. Vol. 112. Art. 102308. DOI: 10.1016/j.adhoc.2020.102308.
107. Zhang Z., Zhou Y., Zhang Y., Qian B. Strong electromagnetic interference and protection in UAVs // Electronics. 2024. Vol. 13. Art. 393. DOI: 10.3390/electronics13020393.

ДОДАТКИ

Додаток А – Список публікацій здобувача за темою дисертації

Додаток Б – Відомості про апробацію результатів дисертації

Додаток В – Довідки про впровадження

Додаток Г – Лістинги програмної реалізації ініціалізації та моніторингу радіоканалів (MATLAB)

Додаток Д – Лістинги алгоритмів спектрального аналізу та тимчасового блокування каналів

Додаток Е – Лістинги алгоритмів вибору робочого каналу та перемикання частоти

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Semendiai S., Tkach Y., Shelest M., Korchenko O., Ziubina R., Veselska O. Improving the Efficiency of UAV Communication Channels in the Context of Electronic Warfare // International Journal of Electronics and Telecommunications. 2023. Vol. 69, No. 4. P. 727–732.
<https://doi.org/10.24425/ijet.2023.147694> (дата звернення 07.04.2026 через VPN-сервери Польщі).
2. Семендйй С. М. Використання технології когнітивного радіо для підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах активного застосування засобів радіоелектронної боротьби // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2023. № 4(20). С. 220–229.
<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20.220229>
3. Семендйй С. М. Підвищення ефективності безпроводових систем передачі даних в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби // Технічні науки та технології. 2023. № 2(32). С. 224–234.
[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-224-234](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-224-234)
4. Семендйй С. М. Адаптивне спектральне маневрування в системах керування роботизованими комплексами в умовах радіоелектронної боротьби // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 2(30). С. 616–629.
<https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.937>
5. Зайцев С. В., Василенко В. М., Семендйй С. М. Огляд адаптивних методів забезпечення достовірності передачі інформації при використанні завадостійкого кодування у системах бездротового зв'язку // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 278–286.
<https://doi.org/10.15276/imms.v11.no4.278>
6. Семендйй С. М., Зайцев С. В. Метод забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних за рахунок структурної адаптації та використання нейронних мереж // Безпека ресурсів інформаційних систем:

- матеріали I Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 16–17 квітня 2020 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2020. С. 182–185.
7. Семендйй С. М. Протидія засобам радіоелектронної боротьби у логістичних безпілотних апаратах шляхом застосування когнітивного радіо // ITSec: Безпека інформаційних технологій: матеріали XIV Міжнар. наук.-техн. конф. (Тернопіль, 22–24 травня 2025 р.). Київ: ДУІКТ, 2025. С. 171–173.
 8. Семендйй С. М. Кіберзахист автономних логістичних систем на базі БПЛА: поточні виклики та прогнози // Юність науки – 2025: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів 23–25 квіт. 2025 р.). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. С. 1136–1137.

ДОДАТОК Б

Відомості про апробацію результатів дисертації

№ п/п	Назви конференції, конгресу, симпозіуму, семінару, школи	Місце проведення	Дата проведення	Форма участі
1	I Міжнар. наук.-практ. конф. «Безпека ресурсів інформаційних систем»	м. Чернігів	16-17 квітня 2020 р.	Заочна
2	XV Міжнародна науково- практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Юність науки – 2025»	м. Чернігів	23–25 квітня 2025 р.	Очна
3	XIV Міжнар. наук.-техн. конф. «ITSec: Безпека інформаційних технологій»	м. Тернопіль	22–24 травня 2025 р.	Очна

ДОДАТОК В

Довідки про впровадження



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Чернігівська політехніка»
кандидат технічних наук, доцент

Анатолій ПРИСТУПА

«02» 12 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

Семендя Сергія Матвійовича

«Методи та моделі забезпечення цілісності даних в безпроводних засобах
передачі інформації»

на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Комісія у складі:

голова комісії – директор Навчально-наукового інституту електронних та інформаційних технологій, канд. екон. наук, доцент Базилевич Володимир Маркович, члени комісії – завідувач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання, д-р. пед. наук, професор Ткач Юлія Миколаївна та канд. техн. наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання Петренко Тарас Анатолійович, розглянувши матеріали дисертаційної роботи Семендя Сергія Матвійовича склала цей акт про те, що в освітній процес кафедри кібербезпеки та математичного моделювання до робочих програм навчальних дисциплін освітніх програм «Кібербезпека» зі спеціальності F5 «Кібербезпека та захист інформації» для першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня вищої освіти впроваджено наступні результати:

Назва освітніх компонент	Науковий результат
1. Системи технічного захисту інформації;	– модель для дослідження характеристик каналу зв'язку в умовах застосування засобів радіоелектронної боротьби;
2. Технології безпеки бездротових та мобільних мереж.	– метод протидії засобам радіоелектронної боротьби у бездротових системах передавання даних; – модель адаптивного радіоканалу керування БпЛА.

Голова комісії

Володимир БАЗИЛЕВИЧ

Члени комісії:

Юлія ТКАЧ

Тарас ПЕТРЕНКО

НІКС**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ****NICS**

Ліцензія Адміністрації Держспецзв'язку
 (наказ Адміністрації Держспецзв'язку № 67 від 27.01.2017 р.).
 Код ЄДРПОУ 25196435, IBAN UA573808050000000026008148951
 в АТ «Райффайзен Банк», МФО 380805, ІПН № 251964326106

02002, Київ,
 вул. Є. Сверстюка, 19, офіс 409
 тел./факс: 541-15-49

<http://www.nics.com.ua>
 mail: office@nics.com.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Т. В. Оудиректора ТОВ «НІКС»



Сергій МАКАРОВ

11 2025
М.П.**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
 аспіранта Національного університету «Чернігівська політехніка»
 СЕМЕНДЯЯ Сергія Матвійовича

Цей акт складено на підтвердження впровадження результатів дисертаційної роботи Семендяя С.М. «Методи та моделі забезпечення цілісності даних в безпроводних засобах передачі інформації».

У ході виконання науково-технічних робіт, пов'язаних із аудитом стійкості та оцінкою ризиків у бездротових системах, були інтегровані такі результати дисертаційного дослідження:

1. Метод протидії засобам радіоелектронної боротьби (МПРЕБ), заснований на адаптивному виборі параметрів радіоканалу залежно від спектральної обстановки та характеристик завад, використано для підвищення достовірності оцінювання загроз від активних засобів РЕБ. Завдяки впровадженню методу було розширено інструментарій лабораторії ТОВ «НІКС» для аналізу стійкості бездротових каналів керування та телеметрії.

2. Модель адаптивного каналу зв'язку з урахуванням РЕБ, застосовується у дослідженнях взаємодії бездротових систем із навмисними завадами, дозволяючи враховувати зміну параметрів середовища, особливості реакції каналу та обмеження радіоелектронного обладнання. Вона інтегрована до симуляційних сценаріїв лабораторії ТОВ «НІКС» для прогнозування поведінки мереж у разі радіоелектронного придушення.

3. Модель для дослідження характеристик каналів зв'язку з урахуванням навмисних завад та сценаріїв РЕБ, яка, на відміну від наявних у лабораторії ТОВ «НІКС» раніше, дозволяє:

- відтворювати різні типи навмисних завад і їх інтенсивність;
- моделювати реакцію каналу в умовах комплексного впливу РЕБ;
- тестувати різноманітні сценарії поведінки противника;
- отримувати кількісні оцінки стійкості каналу на основі параметрів завад (потужність, час виявлення та реагування, спектральна структура тощо).

Ця модель стала основою нової групи внутрішніх тестів для оцінки завадостійкості каналів керування.

Впроваджені результати використовуються в лабораторії ТОВ «НІКС» для:

- аналізу стійкості бездротових каналів керування в умовах активних завад;
- побудови тестових сценаріїв для моделювання поведінки систем під дією РЕБ;
- формування рекомендацій для розробників бездротових систем щодо вибору параметрів радіоканалів;
- підготовки аналітичних звітів із оцінки ризиків у проєктах, що стосуються бездротової інфраструктури та роботизованих систем;
- тренінгових програм для інженерів лабораторії, зокрема при навчанні методам аналізу спектра та оцінки загроз від засобів РЕБ.

Цим Актом засвідчено, що результати дисертаційної роботи фактично впроваджені і використовуються в поточній діяльності лабораторії ТОВ «НІКС».

Заступник начальника відділу ТЗІ ТОВ «НІКС»

Андрій ІВАНОВ



Україна

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ»

14000, м. Чернігів, вул. Гонча, 23, тел. (050) 355-55-68, пошта: a_rudenok@ukr.net, www.isz.kyiv.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Інформаційні системи
захисту»



Олександр РУДЕНОК
2025 р.

АКТ

про впровадження наукових результатів, що отримані аспірантом
Національного університету «Чернігівська політехніка»
СЕМЕНДЯЄМ Сергієм Матвійовичем при виконанні дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії

У діяльність ТОВ «Інформаційні системи захисту» впроваджено результати дисертаційної роботи Семендяє С.М. «Методи та моделі забезпечення цілісності даних в безпроводних засобах передачі інформації». Результати застосовано в ході аналізу завадостійкості каналів передачі даних, моделювання впливу засобів радіоелектронної боротьби та розроблення внутрішніх рекомендацій щодо підвищення стійкості каналів керування бездротовими засобами.

Впроваджені результати, що містять наукову новизну (відповідно до дисертації):

1. Метод протидії засобам РЕБ (МПРЕБ), який базується на адаптивному виборі параметрів каналу зв'язку залежно від поточної радіообстановки та динаміки завад. Цей метод інтегровано у внутрішні процедури моделювання та оцінювання впливу активних засобів РЕБ на канали керування.
2. Модель адаптивного радіоканалу керування, що враховує зміну параметрів середовища, вплив засобів РЕБ та механізми реагування на погіршення якості зв'язку. Модель впроваджена як інструмент для тестування поведінки бездротових каналів та прогнозування їх стійкості у разі радіоелектронного придушення.

Форма впровадження:

- використання моделі у внутрішніх симуляціях та аналітичних розрахунках;
- створення сценаріїв тестування стійкості каналів керування під впливом РЕБ;
- підготовка рекомендацій щодо адаптивної зміни параметрів каналу в умовах завад;
- застосування розробленого методу РЕБ-стійкості у тренінгових матеріалах для фахівців.

Головний фахівець із захисту інформації
ТОВ «Інформаційні системи захисту»

Ребенко Є.О.

ДОДАТОК Г

Програмний код реалізації алгоритмів адаптивного вибору каналу

У цьому додатку наведено фрагменти програмного коду, що описують базові структури даних та процедури моніторингу, які використовуються в алгоритмах адаптивного вибору радіоканалу у розділі 3. Наведені фрагменти коду подані у вигляді, придатному для реалізації в MATLAB та подальшої інтеграції з SDR-платформою (зокрема USRP B210).

Програмний код Г.1 – Ініціалізація таблиці Channels

Наведений програмний код реалізує стартову ініціалізацію паспортної таблиці радіоканалів `Channels`. Перший рядок задає кількість логічних каналів у таблиці: `Nch = 256`. Важливо підкреслити, що це не «фізична» кількість усіх можливих каналів із певним кроком смуги в діапазоні 500 МГц – 6 ГГц, а кількість записів у таблиці каналів, над якою виконуються операції сканування, ранжування та перемикавання. Такий підхід дозволяє працювати з репрезентативною підмножиною частот, достатньою для імітаційного моделювання та обчислювальних експериментів.

`% Ініціалізація`

```
Nch = 256; fMin = 500e6; fMax = 6e9; bw = 200e3;
priorVec = uint8(randi([0 255], Nch, 1));
Channels = initChannels(Nch, fMin, fMax, bw, priorVec);
Cfg = Cfg;
```

Параметри `fMin` і `fMax` задають межі робочого частотного діапазону в герцах (від 500 МГц до 6 ГГц). У середині `initChannels()` на основі цих меж формується вектор центральних частот `fc_Hz` довжини `Nch` (типово через `linspace`). У цьому випадку індекс каналу `ch_id` $\in [0; 255]$ однозначно відображається у відповідну центральну частоту `fc_Hz`. Якщо для конкретного сценарію потрібен не рівномірний, а смуговий або кластеризований вибір частот (наближення до “вікон” спектра), достатньо змінити спосіб формування `fc_Hz` у `initChannels()` без модифікації логіки решти алгоритму.

Параметр `bw = 200e3` задає ширину смуги одного каналу в герцах (200 кГц). Він використовується, зокрема, для оцінки потенційної пропускної здатності каналу `cap_bps = eff_bpsHz * bw_Hz`, де `eff_bpsHz` визначається типом модуляції та (за потреби) схемою кодування.

Вектор `priorVec` формує апріорні пріоритети каналів (`uint8`, діапазон 0...255). У демонстраційному варіанті пріоритети задані випадково, однак у практичному застосуванні вони мають визначатися детерміновано – на основі передексплуатаційних знань про радіообстановку, регуляторних обмежень, допустимих діапазонів, частот “першої черги” тощо.

Функція `initChannels()` створює паспортну таблицю каналів із полями на кшталт: `ch_id`, `fc_Hz`, `bw_Hz`, `mod`, `eff_bpsHz`, `cap_bps`, `prior`, `status`, `block_until`, `last_scan_time`, `noise_dBm`, `snr_dB`, `ber_hat`, `rtt_ms`, `occupancy`, `hist_switches`, `hist_fail`, `note`. Метричні поля на старті ініціалізуються як NaN і заповнюються у процесі моніторингу та сканування.

Програмний код Г.2 – Оновлення метрик активного каналу (`updateMetrics`)

Наведений лістинг ілюструє принцип оновлення показників якості активного каналу. Спочатку знаходиться рядок таблиці `Channels`, що відповідає активному каналу (`status=="active"`), після чого до нього записуються поточні результати моніторингу.

```
% Моніторинг активного каналу
idxAct = find(Channels.status=="active");
meas = struct('snr_dB', 9.5, 'ber_hat', 2e-5, 'rtt_ms', 40, ...
             'occupancy', 0.15);
Channels = updateMetrics(Channels, idxAct, meas, Cfg);
```

Структура `meas` містить поточні вимірювання: `snr_dB` (дБ), `ber_hat` (оцінений *BER*), `rtt_ms` (мс), `occupancy` (частка 0–1). У реальній системі (зокрема на USRP B210) ці параметри формуються з вимірювань приймача

(*SNR*), результатів порівняння бітових послідовностей/масок помилок (*BER*), протокольних таймерів (*RTT*) та спектральних оцінок (*осцирапсу*).

Функція `updateMetrics()` виконує: (1) фіксацію часу; (2) оновлення полів метрик для заданого індексу; (3) застосування експоненційного згладжування (EMA) з коефіцієнтом `Cfg.EMA_alpha` для зменшення впливу миттєвих флуктуацій; (4) оновлення `last_scan_time`.

Програмний код Г.3 – Перевірка порогів якості активного каналу (детектор деградації)

Програмний код реалізує базову логіку визначення факту деградації активного каналу за порогоми *SNR/BER/RTT*. Якщо хоча б один критерій порушено, канал вважається проблемним і ініціюються наступні кроки алгоритму (сканування альтернатив, блокування, вибір нового каналу).

```
% Активний канал і його показники
idxAct = find(Channels.status=="active");
snr_k   = Channels.snr_dB(idxAct);
ber_k   = Channels.ber_hat(idxAct);
rtt_k   = Channels.rtt_ms(idxAct);

% Порогові умови
badSNR = ~isnan(snr_k) && (snr_k < Cfg.SNR_min_dB);
badBER = ~isnan(ber_k) && (ber_k > Cfg.BER_max);
badRTT = ~isnan(rtt_k) && (rtt_k > Cfg.RTT_max_ms);

bad = badSNR || badBER || badRTT;
```

Пороги `Cfg.SNR_min_dB`, `Cfg.BER_max`, `Cfg.RTT_max_ms` задаються у конфігурації та формують формальні умови переходу від режиму моніторингу до режиму реагування.

Програмний код Г.4 – Конфігураційна структура `Cfg` (порогові значення і таймінги)

Наведений лістинг відображає типову структуру конфігурації, яка визначає пороги, таймінги та політики алгоритму. Усі величини задані у фізично

узгоджених одиницях (дБ, мс, секунди, частки), що спрощує інтерпретацію результатів і перенесення в апаратну реалізацію.

```

Cfg.SNR_min_dB      = 8.0;           % мінімально допустимий SNR, дБ
Cfg.BER_max         = 1e-4;          % максимально допустимий BER
Cfg.RTT_max_ms      = 120;           % максимально допустимий RTT, мс
Cfg.Occ_max         = 0.35;          % гранична зайнятість спектра (0..1)

Cfg.EMA_alpha       = 0.2;           % EMA-коефіцієнт згладжування

Cfg.Tblock_s        = 30;            % базовий час блокування, с
Cfg.Scan_period_s   = 1.0;           % період сканування альтернатив, с
Cfg.Scan_settle_ms  = 40;            % час усталення після переналаштування, мс
Cfg.Resync_timeout_ms = 200;         % тайм-аут повторної синхронізації, мс

Cfg.degrade_allowed = false;         % політика тимчасового послаблення критеріїв

```

ДОДАТОК Д

Програмний код алгоритмів виявлення завад, спектрального аналізу та блокування каналів

У цьому додатку наведено фрагменти реалізації кроків, що відповідають *режиму реагування*: запуск спектрального аналізу альтернативних каналів і тимчасове блокування проблемних каналів. Фрагменти програмного коду відповідають підрозділам 3.4–3.5 і використовують таблицю `Channels` та конфігурацію `Cfg` (див. Додаток Г).

Програмний код Д.1 – Спектральний аналіз альтернативних каналів (сканування кандидатів)

Сканування альтернативних каналів виконується після фіксації деградації активного каналу (`bad==true`). У практичній реалізації на USRP B210 сканування відповідає короткочасному переналаштуванню приймача на частоти кандидатів із отриманням оцінок шуму/зайнятості/якості. У симуляторі ці оцінки можуть формуватися через модель завадового профілю та вимірювання похідних метрик.

```
if bad
    % множина індексів для огляду (без активного)
    scanIdx = setdiff(1:height(Channels), idxAct);

    for k = scanIdx
        % Приклад заповнення метрик (у симуляції/емуляції)
        meas = struct( ...
            'noise_dBm', -100 + 10*randn, ...
            'occupancy', max(0, min(1, 0.1 + 0.3*rand)), ...
            'snr_dB', 5 + 10*rand, ...
            'ber_hat', 10^(-(6 + 2*rand)), ...
            'rtt_ms', 20 + 40*rand );

        Channels = updateMetrics(Channels, k, meas, Cfg);
        pause(Cfg.Scan_settle_ms/1000); % час усталення після переналаштування
    end
end
```


Ключова ідея полягає в тому, що після проходу `scanIdx` таблиця `Channels` містить актуалізовану «карту спектральної обстановки» для кандидатів, яку можна використовувати для блокування непридатних каналів та вибору нового робочого каналу.

Програмний код Д.2 – Блокування проблемного активного каналу

Після фіксації деградації активного каналу його необхідно тимчасово виключити з доступних, встановивши статус `blocked` та момент розблокування `block_until`. Причина блокування записується в `note` для протоколювання та подальшого аналізу.

```
reason = compose("SNR<%.1f | BER=%.1e | RTT=%.0f", ...
                Cfg.SNR_min_dB, ber_k, rtt_k);

Channels = blockChannel(Channels, idxAct, Cfg, reason);
```

Функція `blockChannel()` встановлює: `status="blocked"`, `block_until = now + seconds(Cfg.Tblock_s)`, а також збільшує лічильники відмов/перемикань (за потреби).

Програмний код Д.3 – Блокування проблемних кандидатних каналів за результатами сканування

Окремо від активного каналу алгоритм блокує також проблемні кандидатні канали, якщо за результатами сканування вони не проходять фільтри якості (наприклад, низький *SNR*, високий *BER*, висока зайнятість, або ж перетин із завадовою смугою). Це принципово важливо для усунення циклічного перемикання та для зменшення розміру множини кандидатів до реально придатних.

```
candIdx = find(Channels.status=="candidate");

for k = candIdx'
    badCand = false;
```



```

if ~isnan(Channels.snr_dB(k)) && (Channels.snr_dB(k) < Cfg.SNR_min_dB)
    badCand = true;
    reason = "candidate: low SNR";
elseif ~isnan(Channels.ber_hat(k)) && (Channels.ber_hat(k) > Cfg.BER_max)
    badCand = true;
    reason = "candidate: high BER";
elseif ~isnan(Channels.occupancy(k)) && (Channels.occupancy(k) > Cfg.Occ_max)
    badCand = true;
    reason = "candidate: high occupancy";
end

if badCand
    Channels = blockChannel(Channels, k, Cfg, reason);
end
end

```

Блокування кандидатів забезпечує, що в наступному кроці алгоритм ранжує лише ті канали, які пройшли базову валідацію за метриками.

Програмний код Д.4 – Розблокування каналів після завершення таймера

Розблокування виконується періодично: якщо `now >= block_until`, канал повертається в статус `candidate` і може бути повторно перевірений/використаний.

```

tnow = datetime('now');
blkIdx = find(Channels.status=="blocked");

for k = blkIdx'
    if tnow >= Channels.block_until(k)
        Channels.status(k) = "candidate";
        Channels.note(k) = "unblocked by timer";
    end
end

```

ДОДАТОК Е

Програмний код вибору нового робочого каналу, ранжування та перемикавання

У цьому додатку наведено програмну реалізацію кроків вибору найкращого каналу зі сформованої множини кандидатів та виконання перемикавання (у тому числі обробка невдалого повторного встановлення сеансу). Лістинги відповідають підрозділу 3.5.

Програмний код Е.1 – Формування множини кандидатів (candidateSet)

Функція `candidateSet()` повертає індекси каналів, які можуть розглядатися як кандидати на новий робочий канал. З множини виключаються заблоковані канали та канали, які не задовольняють мінімальні вимоги до якості.

```
function cand = candidateSet(Channels, Cfg)
    % Базова фільтрація: лише кандидатні канали
    cand = find(Channels.status=="candidate");

    % Фільтр за метриками (за наявності вимірів)
    ok = true(size(cand));
    for i = 1:numel(cand)
        k = cand(i);

        if ~isnan(Channels.snr_dB(k)) && (Channels.snr_dB(k) < Cfg.SNR_min_dB)
            ok(i) = false;
        end
        if ~isnan(Channels.ber_hat(k)) && (Channels.ber_hat(k) > Cfg.BER_max)
            ok(i) = false;
        end
        if ~isnan(Channels.occupancy(k)) && (Channels.occupancy(k) > Cfg.Occ_max)
            ok(i) = false;
        end
    end

    cand = cand(ok);
end
```

Програмний код Е.2 – Вибір найкращого каналу (pickBestChannel)

Вибір реалізується як ранжування за пріоритетами та метриками. Типова послідовність критеріїв: *пріоритет* \rightarrow *SNR* \rightarrow *BER* \rightarrow *зайнятість*. Алгоритм pickBestChannel обирає канал із максимальним значенням оцінки:

$$Score_i = \omega_1 Prior_i + \omega_2 SNR_i - \omega_3 BER_i - \omega_4 Occupancy_i,$$

де w_k – вагові коефіцієнти, задаються у конфігурації `cfg`. Такий порядок дозволяє поєднати передексплуатаційне програмування (пріоритети) з поточними вимірами стану спектра.

```
function idxNew = pickBestChannel(Channels, cand)
    if isempty(cand)
        idxNew = [];
        return;
    end

    % Значення для ранжування (NaN замінюємо на "гірше" значення)
    prior = double(Channels.prior(cand));
    snr    = Channels.snr_dB(cand);
    snr(isnan(snr)) = -Inf;
    ber    = Channels.ber_hat(cand);
    ber(isnan(ber)) = Inf;
    occ    = Channels.occupancy(cand);
    occ(isnan(occ)) = Inf;

    % Ранжування: більший prior, більший snr, менший ber, менший occ
    score = ...
        1.0 * normalize(prior, 'range') + ...
        0.7 * normalize(snr, 'range') - ...
        0.7 * normalize(log10(ber), 'range') - ...
        0.5 * normalize(occ, 'range');
    [~, imax] = max(score);
    idxNew = cand(imax);
end
```

Програмний код Е.3 – Перемикання на новий канал і обробка невдачі повторної синхронізації

Після вибору каналу `idxNew` виконується перемикання: у реальній системі це апаратне перестроювання частоти (USRP API) і повторна ініціалізація сеансу зв'язку. Якщо повторна синхронізація неуспішна, новий канал також тимчасово блокується, щоб уникнути повторного вибору непридатного варіанта.

```
if ~isempty(idxNew)
    % 1) Апаратне перестроювання частоти (у реальній системі – USRP API)
    % setCenterFrequency(usrp, Channels.fc_Hz(idxNew));

    % 2) Повторна ініціалізація сеансу зв'язку
    % (у моделі – маркер успіху/невдачі)
    resync_ok = true; % має бути результат протоколу/синхронізації

    if resync_ok
        Channels = applySwitch(Channels, idxNew);
    else
        Channels = blockChannel(Channels, idxNew, Cfg, "resync failed");
    end
end
```

Програмний код Е.4 – Головний цикл адаптивного алгоритму (узагальнений каркас)

Наведений каркас відображає послідовність кроків: *моніторинг* → *детекція деградації* → *сканування* → *блокування* → *відбір кандидатів* → *вибір* → *перемикання*.

```
while true
    % 1) Моніторинг активного каналу
    idxAct = find(Channels.status=="active");
    meas = getActiveMeasurements(); % абстракція джерела вимірів
    Channels = updateMetrics(Channels, idxAct, meas, Cfg);

    % 2) Детекція деградації
    bad = detectDegradation(Channels, idxAct, Cfg);
```

```
if bad
    % 3) Скандування альтернатив
    Channels = scanAlternatives(Channels, idxAct, Cfg);

    % 4) Блокування активного та проблемних кандидатів
    Channels = blockActiveAndBadCandidates(Channels, idxAct, Cfg);

    % 5) Відбір кандидатів і вибір найкращого
    cand = candidateSet(Channels, Cfg);
    idxNew = pickBestChannel(Channels, cand);

    % 6) Перемикання
    Channels = switchToChannel(Channels, idxNew, Cfg);
end

% 7) Перевірка таймерів блокування
Channels = unblockByTimer(Channels);

pause(Cfg.Monitor_period_s);
end
```