

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ С. П. КОРОЛЬОВА

**ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ, ВИПРОБУВАННЯ,
ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ
СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

21

Житомир
2021

Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. Вип. 21 / Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. – Житомир : ЖВІ, 2021. – 72 с. – ISSN 2076-1546. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.21>

Наказами Міністерства освіти і науки України від 09.02.2021 № 157 та від 15.04.2021 № 420 збірник наукових праць включений у категорію «Б» Переліку наукових фахових видань України.

Науковий профіль видання:

122 – Комп'ютерні науки

125 – Кібербезпека

255 – озброєння та військова техніка

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, протокол № 6 від 26.11.2021.

Головний редактор – ФРИЗ С. П., заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

Відповідальний секретар – КАНЕВСЬКИЙ Л. Б., кандидат технічних наук (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

Члени редакційної колегії:

ВАСЮТА К. С., заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор (Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна);

ГРИЦУК Р. В., заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

ЖУРАВСЬКИЙ Ю. В., доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

КОВБАСЮК С. В., лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

МЕРЧИК Зигмунт, доктор технічних наук, професор (Військова технічна академія, Республіка Польща);

ПІЛЬКЕВИЧ І. А., заслужений працівник освіти України, доктор технічних наук, професор (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна);

САЩУК І. М., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник (Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Україна).

ISSN 2076-1546

Наукові статті, включені до збірника наукових праць, пройшли рецензування.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21859-11759 ПР від 21.12.2015.

ЗМІСТ

Бугайов М. В., Нагорнюк О. А., Клязника В. В., Рикун В. Л., Гаврилюк О. С. Реалізація підходів до імітування динамічної радіоелектронної обстановки в широкій смузі частот.....	4
Лагодний О. В., Мордас І. П., Павленко В. О. Метод визначення похибок експертних даних під час оцінювання інформації.....	16
Гребенюк О. П., Роговець М. А., Гребенюк О. О. Застосування просторової обробки в системах зв'язку й передачі даних комплексів радіомоніторингу для забезпечення заводо захищеності.....	29
Гаценко С. С., Сапожников К. М., Пазич І. В., Гаєвський О. В., Костінський С. В. Багатоканальний радіоприймальний пристрій із розширеним частотним діапазоном приймання.....	39
Фриз С. П., Авсієвич Р. О. Аналіз космічних систем виявлення рухомих надводних об'єктів.....	46
Гаценко С. С., Муравйов А. В., Мамайсур Р. М., Мостовий С. В., Пятак Д. В. Математична модель функціонування підсистеми розпізнавання системи розвідки...	61
Автори випуску	70

М. В. Бугайов, О. А. Нагорнюк, В. В. Клязника, В. Л. Рикун, О. С. Гаврилюк

РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ІМІТУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ОБСТАНОВКИ В ШИРОКІЙ СМУЗІ ЧАСТОТ

Однією з основних особливостей збройного конфлікту на сході України залишається ведення бойових дій в умовах динамічної зміни складної радіоелектронної обстановки. Постійне зростання насиченості радіоефіру, використання різномісних протоколів передавання даних зумовлюють необхідність підвищення рівня підготовленості військових фахівців у сфері технічного аналізу сигналів та розпізнавання випромінювань. Це, у свою чергу, актуалізує необхідність реалізації підходів до імітування динамічної радіоелектронної обстановки у широкій смузі частот для їх використання в навчальному процесі. Формування радіоелектронної обстановки із використанням технологій програмовизначеного радіо дозволяє створити сценарій практично будь-якої складності. Радіоелектронна обстановка у широкій смузі частот може розроблятися в реальному масштабі часу або бути заздалегідь сформованою і записаною в необхідному форматі. Для створення програмних модулів формування радіосигналів в реальному масштабі часу доцільно використати платформу цифрової обробки сигналів GNU Radio. Максимальна ширина смуги частот в такому разі відповідає максимальній частоті дискретизації використаного приймально-передавального модуля. За такого підходу можна в реальному масштабі часу змінювати потужність і несучу частоту всіх складових. Обмеження формування сигналів у реальному масштабі часу із використанням GNU Radio пов'язані з тим, що ширина смуги та складність сигнальної обстановки, яка може бути сформована, залежать від продуктивності процесора комп'ютера. Записи радіоелектронної обстановки можна сформувати з використанням мов програмування високого рівня: Python та Matlab, – які містять широкий вибір спеціалізованих бібліотек з обробки сигналів. У подальшому такі файли можна використовувати для їх аналізу в режимі офлайн за допомогою відповідних програмних засобів або як джерела сигналів для випромінювання програмовизначеними радіосистемами.

Ключові слова: динамічна радіоелектронна обстановка; комплексний сигнал; програмовизначене радіо; GNU Radio; Python; Matlab.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Бойові дії на сході України характеризуються досить специфічними способами та методами їх ведення. Однією з основних особливостей збройного конфлікту на сході України залишається ведення бойових дій в умовах динамічної зміни складної радіоелектронної обстановки (РЕО). Тому в даний час досить актуальними є заходи, пов'язані з формуванням динамічної РЕО в ході вирішення широкого кола завдань, зокрема пов'язаних із підготовкою військових фахівців.

Для забезпечення стійкого, безперервного та надійного зв'язку, виконання вимог прихованого управління військами на сучасному полі бою розгортають багаторівневу

систему управління та зв'язку, важливою частиною якої є мережі радіозв'язку ультракороткохвильового (УКХ) діапазону частот. Організація систем тактичного УКХ радіозв'язку здійснюється з використанням аналогових та цифрових радіостанцій як військового, так і цивільного призначення. Для передачі важливих повідомлень застосовують цифрові радіостанції з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти (ППРЧ). Радіосигнали із цифровими видами модуляції використовують також для організації командної радіолінії управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та в каналах телеметрії [1]. Можливе функціонування режиму ППРЧ у межах дозволеної смуги частот. Також для управління комерційними БПЛА використовують радіосигнали стандартів Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n.

Постійне зростання насиченості радіоефіру, використання різнотипних протоколів передавання даних зумовлюють необхідність підвищення рівня підготовки фахівців у сфері технічного аналізу сигналів та розпізнавання випромінювань. Це, у свою чергу, актуалізує розроблення підходів до імітування динамічної РЕО в широкій смузі частот для їх використання в навчальному процесі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед імітаторів радіосигналів закордонного виробництва можна виділити вироби типу AN/PLM-4 (RSS), “Шиповник-2”, “Астра-2” та “Аврора”. Дані пристрої є вузькоспеціалізованими, вони призначені для вирішення часткових завдань. У [2] описано розроблений програмно-апаратний комплекс імітації сигналів радіоелектронних систем і комплект спеціального програмного забезпечення імітації РЕО. Кількість пристроїв імітації може становити кілька десятків екземплярів, вони об'єднуються в єдину просторово-розподілену систему та функціонують за заданим сценарієм. У [3–5] описано алгоритми формування багатьох типів сигналів із використанням мови програмування Python. Відомі також численні приклади реалізації подібних алгоритмів у середовищі Matlab [6–8]. Проте описані рішення забезпечують створення досить простої РЕО.

На даний час переважна більшість засобів радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки мають відносно широку миттєву смугу огляду (десятки мегагерц), тому в деяких діапазонах частот (особливо в ISM-діапазонах) завантаженість смуги частот аналізу різнотипними сигналами може бути досить високою. Усе це створює передумови до вдосконалення відомих та розроблення нових підходів до формування складної РЕО.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є практична реалізація підходів до імітування динамічної РЕО в широкій смузі частот.

Виклад основного матеріалу

Технологія програмновизначеного радіо

На даний час більшість функцій сучасної радіосистеми реалізується з використанням не апаратного, а програмного забезпечення. Це спричинило розроблення архітектури програмновизначеної радіосистеми (ПВР): радіопередавач і/або радіоприймач, який використовує технологію, що дозволяє за допомогою програмного забезпечення встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи діапазон частот, тип модуляції, кодування, вихідну потужність [9–10]. Найбільш розповсюджені приймально-передавальні пристрої побудовані з використанням технології ПВР

дозволяють випромінювати сформовану сигнальну суміш у діапазоні від 0 до 18 ГГц із максимальною шириною смуги частот до 245 МГц. Розрядність цифро-аналогового перетворювача таких пристроїв досягає 16 біт, що дозволяє формувати сигнали із практично всіма видами сигнально-кодових конструкцій. У разі необхідності сформувати широкосмугову динамічну РЕО в діапазоні частот, значення якого перевищує максимальну ширину смуги передавача, можна використати декілька пристроїв ПВР. Отже, сучасна радіоелектронна база дозволяє імітувати сигнально-завадову обстановку практично в необмеженому частотному діапазоні.

Пропонуємо два основні підходи до імітування динамічної РЕО в широкій смузі частот:

формування РЕО в реальному масштабі часу та випромінювання сигналу з використанням ПВР;

формування РЕО заздалегідь, запис сформованих комплексних відліків сигналу до спеціалізованого файлу та наступне його випромінювання з використанням ПВР.

На вибір підходу до імітування динамічної РЕО впливають розрахункова складність сценарію, пов'язана із шириною частотного діапазону та кількістю сигналів, що моделюються.

Структура програмно-апаратного комплексу імітування РЕО є однаковою для двох запропонованих підходів, вона повинна включати персональну електронно-обчислювальну машину (ПЕОМ), сукупність ПВР, підсилювачів потужності та широкосмугових антен.

Нижче наведено опис процесу формування широкосмугового сценарію РЕО в середовищі GNU Radio. Розроблення з використанням інших програмних засобів буде схожим. Однак GNU Radio має низку переваг: програмний продукт розповсюджується із відкритим кодом, є кросплатформним, містить широкий набір бібліотек, які дозволяють створювати довільні радіосистеми, схеми модуляції та кодування, працює із найбільш розповсюдженими ПВР.

Формування РЕО в реальному масштабі часу

Код більшості компонентів GNU Radio написаний мовою програмування Python, а частини, критичні до швидкодії та часу затримки, – мовою C++, що дозволяє використовувати пакет для вирішення завдань у режимі реального часу [11]. До складу GNU Radio входить набір фільтрів, каналних кодеків, модулів синхронізації, демодуляторів, еквалайзерів, голосових кодеків, декодерів й інших елементів, необхідних для створення радіосистем. Зазначені елементи можуть бути використані як складові для компонування готової системи. Якщо необхідно створити компонент зі специфічним функціоналом, якого немає в бібліотеці (out-of-tree module), то GNU Radio має у своєму складі утиліту для створення шаблону нового блоку – `gr_modtool` [12].

Проект GNU Radio подано у вигляді потокового графа, вузли якого відображають блоки оброблення сигналів, а ребра – потоки даних між блоками. Блоки, які реалізують складні алгоритми обробки сигналів, написані мовою C++. Кожен блок характеризується параметрами, які позначають кількість вхідних і вихідних портів, тип даних, який вони обробляють. Пакет включає набір бібліотек, кожна з яких складається з декількох блоків для обробки сигналів. Для підключення бібліотек, реалізованих на мові C++ з керуючим

скриптом, написаним на Python, використовується генератор інтерфейсу SWIG. Програми на C++ реалізують алгоритми оброблення сигналів, Python використовують для формування потокового графа, об'єднання блоків і запуску програми на виконання. У разі використання SWIG усі бібліотеки на C++ стають доступними з вихідного програмного коду на Python.

За ПВР можна вибрати будь-який трансивер, сумісний з GNU Radio [13]. Якщо використати Hack RF One [14], який може працювати з частотами дискретизації від 8 МГц до 20 МГц, то смугу для формування сигнальної обстановки можна обрати із заданого діапазону. Більша частота дискретизації вимагає використання більш продуктивного процесора ПЕОМ та більшого об'єму оперативної пам'яті для формування сигналів у реальному масштабі часу. Для побудови графів формування радіосигналів у GNU Radio оберемо смугу частот шириною 8 МГц.

У заданій смузі будемо формувати сигнальну суміш, що є сумою широкосмугового шуму, трьох вузькосмугових (гармонічних) завад, а також OFDM, QAM і ППРЧ сигналів. Також забезпечимо можливість змінювати потужність та несучу частоту усіх складових у реальному масштабі часу. Під час проведення практичних занять у спеціалізованій аудиторії через близькість розташування приймальної та передавальної антени ефект впливу каналу поширення радіохвиль (завмирання) можна моделювати шляхом внесення спотворень у сформовану сигнальну суміш у самому графі GNU Radio.

У стандартній бібліотеці GNU Radio є набір блоків для реалізації схем формування сигналів із цифровими видами модуляції: OFDM, GFSK, GMSK, QAM, PSK, CPFSK тощо. Також за допомогою блоків Constellation Rect. Object та Constellation Modulator можна створювати довільні фазові сузір'я. Бажаний функціонал даних блоків може бути досягнутий правильним вибором значень їх параметрів. З метою формування сигналу із міжсимвольною та посимвольною ППРЧ для стандартної бібліотеки було розроблено та додано власний блок FHSS.

Після запуску файлу із зібраним графом формування сигналу з розширенням *.gnc у цьому ж каталозі буде створено файл із розширенням *.grc. Для подальшого користування в ході роботи з операційною системою Linux можна запускати будь-який із цих двох файлів. Їх відмінність полягає в тому, що в разі запуску файлу із розширенням *.grc відразу ж запускатиметься робоче вікно і вмикатиметься передавач, а за розширення *.gnc спочатку відкриється середовище GNU Radio Companion, у якому можна здійснювати зміну параметрів блоків і запускати граф на виконання. У разі формування сигналів у GNU Radio основним параметром, який визначає усі часові інтервали, що використовуються у графі, є частота дискретизації.

У ході запуску графа на виконання відкривається графічний інтерфейс користувача (рис. 1) і відразу ж починається формування сигналів. У лівій верхній частині інтерфейсу розташовано 3 вкладки: "Параметри сигналів", "Характеристики каналу" та "Параметри передавача". На вкладці "Параметри сигналів" містяться інструменти для регулювання центральної частоти та амплітуди сигналів із ППРЧ, QAM та OFDM. У нижній частині інтерфейсу відображаються спектр та спектрограма сформованої сигнально-завадової обстановки.

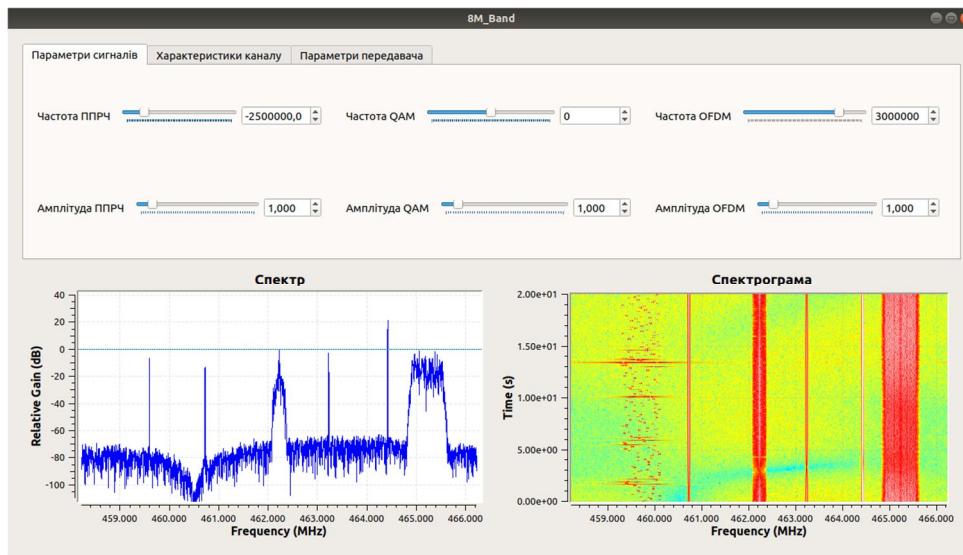


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача з відкритою вкладкою “Параметри сигналів”

На вкладці “Характеристики каналу” (рис. 2) розташовано інструменти для регулювання середньоквадратичного відхилення шуму, кількості синусоїд (шляхів поширення сигналу) та швидкості завмирань для моделювання стану каналу, а також амплітуд та частот вузькосмугових завад.

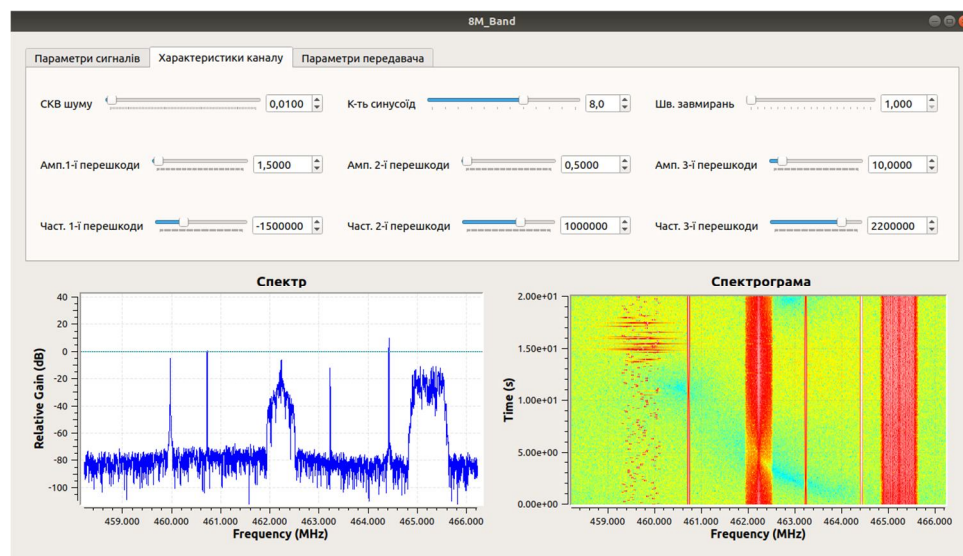


Рис. 2. Графічний інтерфейс користувача з відкритою вкладкою “Характеристики каналу”

Частотно-селективні завмирання в каналі поширення моделюються за допомогою блоку Frequency Selective Fading Model. Налаштуванню підлягають кількість синусоїд для моделювання підсилення в кожному промені (шляху поширення сигналу), нормалізований максимальний доплерівський зсув частоти, модель каналу (Релея або Райса), а також параметри фільтра для моделювання затримок у кожному промені.

На вкладці “Параметри передавача” (рис. 3) можна встановити несучу частоту передавача HackRF One (повинна бути в межах смуги пропускання антени), включати або

відключати підсилювач потужності на несучій частоті, а також змінювати в межах від 0 дБ до 47 дБ з кроком 1 дБ коефіцієнт підсилення на проміжній частоті.

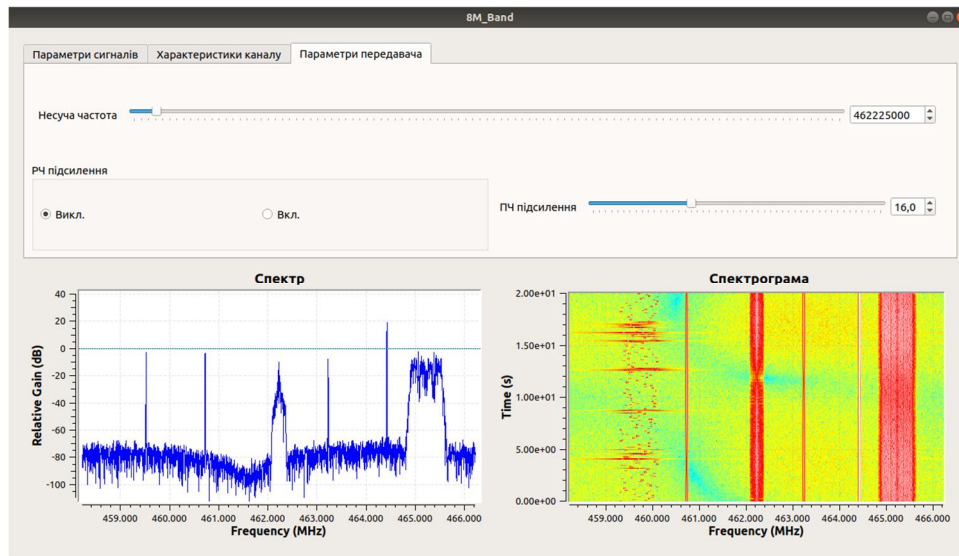


Рис. 3. Графічний інтерфейс користувача з відкритою вкладкою “Параметри передавача”

Обмеження формування РЕО в реальному масштабі часу із використанням GNU Radio пов’язані з тим, що ширина смуги і складність РЕО залежать від продуктивності ПЕОМ. Проте можна використовувати записи широкосмугових сценаріїв із використанням відповідного блоку зчитування.

Створення записів динамічної РЕО в широкій смузі частот

Записи динамічної РЕО в широкій смузі частот можна використовувати для їх аналізу в режимі офлайн за допомогою відповідних програмних засобів (наприклад, Signals Analyzer) або як файлів для випромінювання.

Кожний стандарт зв’язку встановлює перелік видів модуляцій, які можуть використовуватися для формування радіосигналу, та діапазон зміни основних параметрів (символьна швидкість, несуча частота, зсув частот). Крім того, для підвищення розвідзахисності та завадостійкості в телекомунікаційних системах використовують розширення спектра сигналу.

Загальний математичний опис радіосигналу для будь-якого виду модуляції, який розповсюджується в каналі, що описується гаусівською моделлю, можна подати як:

$$r(t, U_i) = s(t, U_i) + n(t), \quad (1)$$

де $s(t, U_i)$ – корисна складова;

$n(t)$ – адитивний гаусівський шум;

$U_i = \left[a_i, f_c, \theta, T, \varepsilon, g(t), \left\{ s_k^{(i)} \right\}_{k=1}^K \right]$ – вектор модуляційних параметрів;

a_i – амплітуда сигналу;

f_c – частота несучого коливання;

θ – початкова фаза несучого коливання;

T – символний період;

ε – параметр, що визначає фазу модулюючого коливання;

$g(t)$ – сумісна імпульсна характеристика формуючого фільтра та каналу;

$\{s_k^{(i)}\}_{k=1}^K$ – K комплексних символів, що передаються та беруться з i -го кінцевого

алфавіту для відповідного виду модуляції.

Корисний сигнал з лінійною цифровою модуляцією описується таким виразом:

$$s(t, U_i) = a_i e^{j(2\pi f_c t + \theta)} \sum_{k=1}^K s_k^{(i)}(t) g(t - (k-1)T - \varepsilon T). \quad (2)$$

Амплітуда сигналу визначається за формулою

$$a_i = \sqrt{\frac{E_s}{\sigma_{s^{(i)}}^2} E_p}, \quad (3)$$

де E_s – енергія сигналу на нульовій частоті;

E_p – енергія імпульсу;

$\sigma_{s^{(i)}}^2$ – дисперсія i -го фазового сузір'я сигналу з нульовим математичним сподіванням.

Розглянемо формування сигнальної суміші з використанням мови програмування Python та її запис у форматі *.wav, хоча вибір формату файлу не є принциповим.

Файл у форматі *.wav складається із області заголовка та області даних. У заголовку зберігається інформація про розмір файлу, кількість каналів, частоту дискретизації, кількість біт у відліку сигналу. Амплітуда відліку виражається числом, що займає у файлі, як правило, 8, 16, 24 або 32 біти. Чим більше місця займає число у файлі, тим ширший можливий діапазон його значень і вища точність відтворення амплітуди сигналу. Для РСМ-файлів із розрядністю 16 біт значення амплітуди знаходяться в межах 32767 ... 32768.

Для дійсного сигналу значення амплітуд в області даних розміщуються послідовно. Для комплексного сигналу значення дійсної та уявної частини відліків сигналу записуються у два канали. Фрагмент коду для формування і запису комплексного сигналу у *.wav файл наведено нижче.

```

1. import wave
2. import struct
3. import numpy as np
4. from scipy import signal
5. samplerate = int(8e6)
6. t_reo = 120
7. section_length = int(1e5)
8. L = int(samplerate*t_reo)//section_length
9. nchannels = 2

```

```

10. sampwidth = 2
11. nframes = L*section_length
12. comptype = 'NONE'
13. compname = 'not compressed'
14.
15. wav_file = wave.open(file_name, 'w')
16. wav_file.setparams((nchannels, sampwidth, samplerate, nframes, comptype,
compname))
17.
18. A = np.iinfo(np.int16).max
19.
20. #Блок встановлення параметрів складових
21.
22. for i in range(L):
23.     t = np.arange(i*section_length, (i+1)*section_length)/samplerate
24.
25. #Блок формування складових широкосмугового сценарію
26.
27.     s = signal.hilbert(sig)
28.     I = np.real(s)
29.     I = I.astype(np.int16)
30.     Q = np.imag(s)
31.     Q = Q.astype(np.int16)
32.     s = np.vstack((I, Q)).T
33.     data = s.flatten()
34.     buf = struct.pack(str(len(data)) + 'h', *data)
35.     wav_file.write(buf)
36. wav_file.close()

```

У рядках 1–4 виконується імпорт необхідних пакетів. У 5 встановлюється необхідна частота дискретизації *samplerate*, у рядку 6 – тривалість запису в секундах, у 7 – довжина фрагмента сигналу (у відліках), який формується і записується за один раз. Для обраної частоти дискретизації, тривалості запису і розрядності амплітуди об’єм сформованого сигналу на диску займатиме $8 \text{ (МГц)} \cdot 120 \text{ (с)} \cdot 16 \text{ (біт)} = 1,92 \text{ (ТГб)}$. Тому одночасне формування і запис такого величезного об’єму даних доцільно проводити фрагментами. Для довжини фрагмента 100000 відліків час, необхідний для формування і запису сигналу тривалістю 120 с на ПЕОМ із процесором Intel Core i7-10510U CPU 1,80 GHz \times 8 з об’ємом оперативної пам’яті 16 ГГб під управлінням операційної системи Ubuntu 20.04.2, становить близько 500 с. Кількість фрагментів запису *L* розраховується в рядку 8. Для кожного фрагмента в циклі (рядки 22–35) створюється масив моментів часу (рядок 23), для яких розраховуються відліки складових широкосмугового сценарію *sig*. Після формування усіх складових вони додаються. У рядку 15 створюється об’єкт файлу запису, а в 16 встановлюються його параметри. Перед циклом формування сценарію необхідно задати часові, частотні та енергетичні параметри усіх складових. Значення центральних частот складових задаються в межах від 0 до *samplerate*. Особливістю

встановлення часових параметрів для сигналів із цифровими видами модуляції є те, що на тривалості фрагмента запису повинна вміщатися ціла кількість символів (частотних елементів для ППРЧ). Щодо енергетичних параметрів сигналів, то сума амплітуд складових у жоден момент часу не повинна перевищувати 2^{16} або бути меншою -2^{16} . У протилежному разі виникатимуть амплітудні спотворення.

Для формування дійсного сигналу необхідно встановити один канал запису ($nchannels = 1$), значення центральних частот складових обирати в межах від 0 до $samplerate/2$ та в рядку 34 для упаковки буфера замість даних data використовувати відліки sig, які попередньо необхідно привести до типу int16.

Створені записи широкосмугових сценаріїв можна використовувати для проведення практичних занять як завдання для аналізу в режимі офлайн, як джерело сигналу в графах GNU Radio або інших програмних засобах. На рис. 4 наведено графічний інтерфейс користувача програми “HackRFBoard”, яка дозволяє завантажувати запис комплексного сигналу у форматі *.wav та розпочинати випромінювання за допомогою ПВР HackRF One. На вкладках Oscilogramm та Spectrum відображається часова реалізація та спектр завантаженого широкосмугового сценарію.

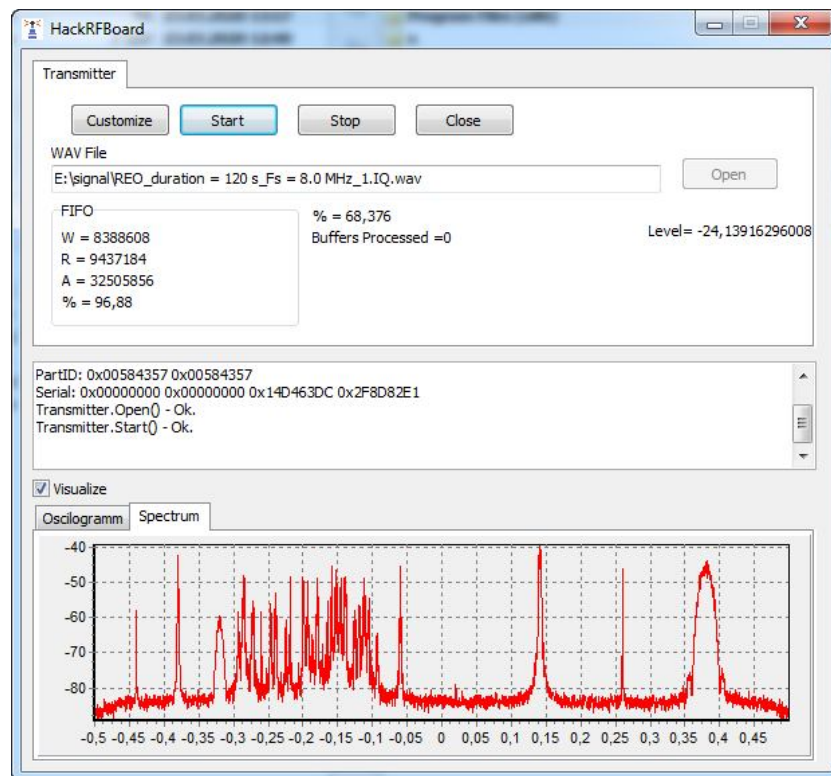


Рис. 4. Графічний інтерфейс користувача з відкритою вкладкою “HackRFBoard”

Спектрограму сформованого широкосмугового сценарію наведено на рис. 5. Поряд із сигналами із цифровими видами модуляції (QAM-16, FSK-2, PSK-4, ППРЧ) розміщено сигнали з амплітудною модуляцією АЗЕ у смузі 6 кГц та частотною модуляцією F3Е у смузі 16 кГц. Останні два види сигналів імітують роботу аналогових радіостанцій під час передачі мовленнєвих повідомлень. Гармоніки імітують вузькосмугові завади.

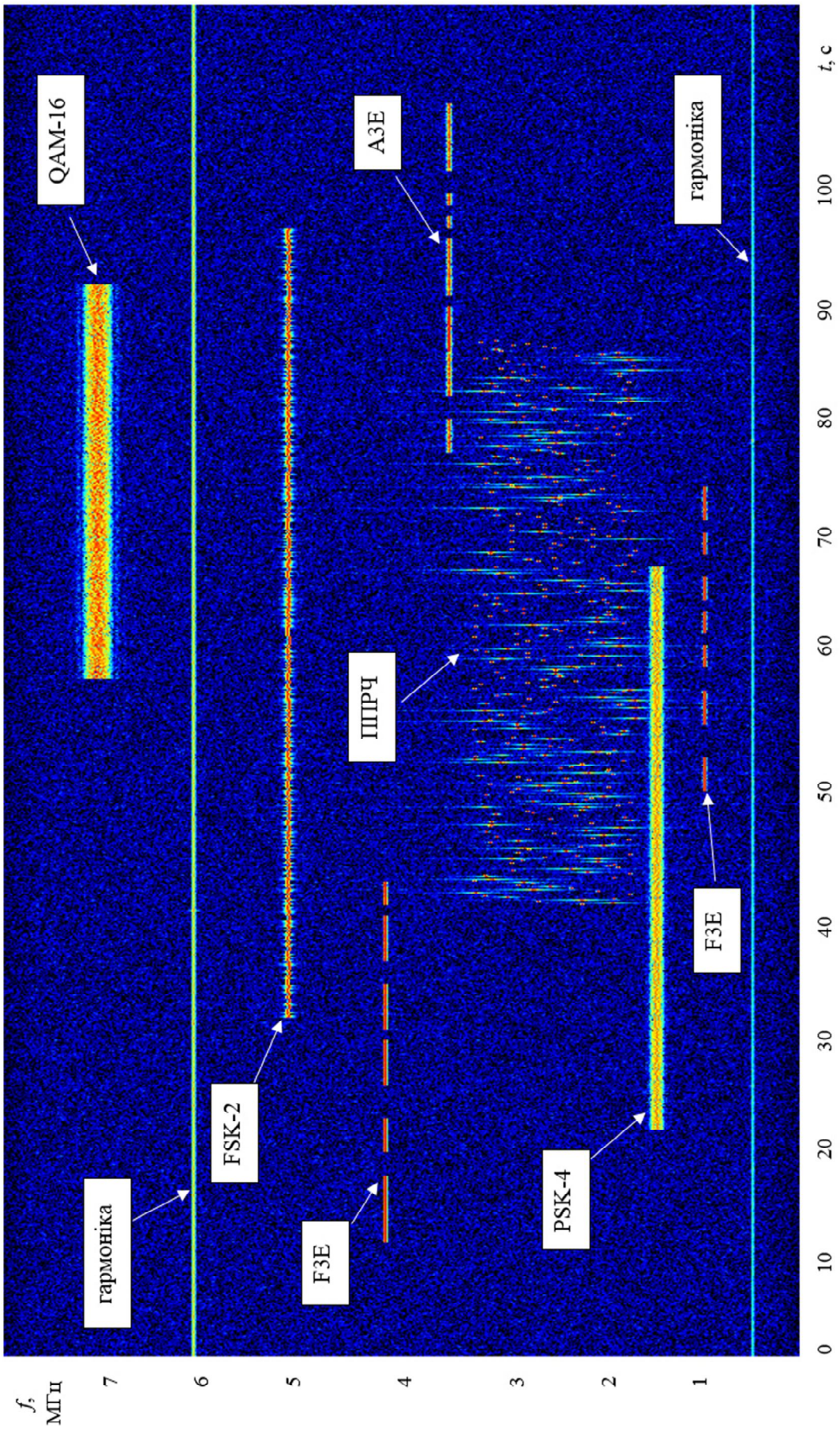


Рис. 5. Частотно-часове зображення динамічної РЕО в широкій смузі частот

Висновки. Запропоновано реалізацію підходів до формування динамічної РЕО в реальному масштабі часу та до попереднього створення їх записів із використанням мови програмування високого рівня. Окреслено ключові моменти роботи з платформою GNU Radio в ході формування динамічної РЕО в широкій смузі частот та запропоновано варіант графа генерування сигналів. Удосконалено математичний апарат описання радіосигналу зі складними видами модуляції. Наведено варіант створення запису сигнальної суміші у форматі *.wav із використанням мови програмування Python. Отримані результати в подальшому можуть бути використані під час проведення практичних занять для підвищення рівня підготовки військових фахівців.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробленні гнучких алгоритмів формування сигналів зі складними видами модуляції.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Chamola V. et al. A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Networks* 111. 2021. 20 p. doi: [10.1016/j.adhoc.2020.102324](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324)
2. Программно-аппаратные средства формирования управляемой радиоэлектронной обстановки. URL: <http://www.ntc-reb.ru/article15.html> (дата обращения: 07.10.2021).
3. Downey A. B. Think DSP: Digital Signal Processing in Python. Green Tea Press, 2014. 153 p.
4. Charbit M. Digital Signal Processing with Python Programming. Wiley, 2017. 284 p.
5. Unpingco J. Python for Signal Processing. Featuring IPython Notebooks. Springer, 2014. 133 p.
6. Gopi E. S. Algorithm Collections for Digital Signal Processing Applications Using Matlab. Springer, 2007. 199 p.
7. Quinquis A. Digital Signal Processing using MATLAB. John Wiley & Sons, Inc., 2007. 425 p.
8. Bassem R. Mahafza. MATLAB simulations for radar systems design. Springer, 2004. 686 p.
9. Grayver E. Implementing Software Defined Radio. Springer, 2013. 271 p.
10. Collins T. F. et al. Software-Defined Radio for Engineers. Artech House, 2018. 375 p.
11. GNU Radio. URL: <https://www.gnuradio.org/> (last accessed: 12.10.2021).
12. Out Of Tree Modules. URL: https://wiki.gnuradio.org/index.php/OutOfTreeModules#Other_types_of_blocks (last accessed: 10.10.2021).
13. List of software-defined radios. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software-defined_radios (last accessed: 12.10.2021).
14. HackRF. URL: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/> (last accessed: 10.10.2021).

Стаття надійшла до редакції 08.11.2021.

REFERENCES

1. Chamola, V. et al. (2021). A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Networks*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
2. *Программно-аппаратные средства формирования управляемой радиоэлектронной обстановки [Hardware and software for the formation of a controlled electronic environment]*. (n.d.). Retrieved from <http://www.ntc-reb.ru/article15.html> [in Russian].

3. Downey, A. B. (2014). *Think DSP: Digital Signal Processing in Python*. Green Tea Press.
4. Charbit, M. (2017). *Digital Signal Processing with Python Programming*. Wiley.
5. Unpingco, J. (2014). *Python for Signal Processing. Featuring IPython Notebooks*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01342-8>
6. Gopi, E. S. (2007). *Algorithm Collections for Digital Signal Processing Applications Using Matlab*. Springer.
7. Quinquis, A. (2007). *Digital Signal Processing using MATLAB*. John Wiley & Sons, Inc.
8. Bassem, R. Mahafza. (2004). *MATLAB simulations for radar systems design*. Springer.
9. Grayver, E. (2013). *Implementing Software Defined Radio*. Springer.
10. Collins, T. F. et al. (2018). *Software-Defined Radio for Engineers*. Artech House.
11. *GNU Radio*. (n.d.). Retrieved from <https://www.gnuradio.org/>
12. *Out Of Tree Modules*. (n.d.). Retrieved from https://wiki.gnuradio.org/index.php/OutOfTreeModules#Other_types_of_blocks
13. *List of software-defined radios*. (n.d.). Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software-defined_radios
14. *HackRF*. (n.d.). Retrieved from <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>

M. V. Buhaiov, O. A. Nahorniuk, V. V. Kliazyuka, V. L. Rykun, O. S. Havryliuk
REALIZATION OF APPROACHES TO SIMULATION DYNAMIC BROADBAND SCENARIOS OF ELECTRONIC ENVIRONMENT

One of the main principles of the armed conflict in the east of Ukraine remains warfare in a dynamic change of complex electronic environment. The constant increase frequency bands occupancy, the use of various types of data transmission protocols necessitates an increase in the level of training of military specialists in the field of technical analysis of signals and radio emissions recognition. This, in turn, necessitates the development of approaches to simulating wideband scenarios for use in training process. The formation of the electronic environment using the technology of software-defined radio allows us to create a scenario of almost any complexity. Wideband scenarios can be generated in real time or be pre-generated and recorded in desired format. It is advisable to use the GNU Radio digital signal processing platform to develop software modules for generating real-time radio signals. Using this software it is possible to generate signals with analog and digital types of modulation, including frequency hopping and spread spectrum signals. The maximum bandwidth of the scenario corresponds to the maximum sampling frequency of the transceiver used. With this approach, you can change the power and carrier frequency of all components online. The limitations of real-time signal generation using GNU Radio are due to the fact that the bandwidth and complexity of the signal environment that can be generated depends on the performance of the computer's processor. Wideband scenario can be generated in any format using the high-level Python programming language. Further such files can be used for their analysis offline using appropriate software or as a signal source for radiation by software-defined radio systems.

Keywords: *electronic environment; wideband scenario; complex signal; GNU Radio; Python; Matlab.*

О. В. Лагодний, І. П. Мордас, В. О. Павленко

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБОК ЕКСПЕРТНИХ ДАНИХ ПІД ЧАС ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Відповідно до ст. 8 Закону України “Про державну таємницю” до державної таємниці належить інформація у сфері оборони, економіки, науки й техніки, зовнішніх відносин, державної безпеки та охорони правопорядку. Належність інформації до перерахованих вище сфер реалізує лише необхідні умови її віднесення до секретної. Остаточне рішення в питанні обмеження доступу до інформації приймається з урахуванням оцінки рівня шкоди, що може бути завдана національній безпеці України в разі її розголошення, та доцільності такого рішення з боку державного експерта з питань таємниць. Згідно з вимогами нормативно-правових актів умови віднесення інформації до державної таємниці мають комплексний характер і визначаються за критеріями можливої шкоди національній безпеці України, внаслідок розголошення цієї інформації, та за критеріями доцільності її засекречування.

У ході використання методу експертних оцінок експерт визначає критерії, за якими проводиться оцінювання інформації для визначення рівня шкоди національній безпеці України. Дані критерії ґрунтуються на суб’єктивному судженні експерта, тобто визначенні якісних оцінок інформації. Виходячи із зазначеного вище, експертні методи базуються виключно на оцінках експертів, зроблених щодо об’єкта оцінювання, який вони всебічно вивчили. У такому разі механізм оцінювання інформації залишається чітко не невизначеним та недостатньо дослідженим щодо кількісного оцінювання.

Кількісні оцінки інформації дозволяють об’єктивно визначити рівень шкоди національній безпеці України та мінімізувати рівень суб’єктивізму в ході цього процесу. Результати даної роботи можуть бути реалізовані у вигляді модуля спеціалізованого програмного забезпечення для перевірки рівня компетентності особи, яка бере участь у процедурі оцінювання інформації.

Отже, ефективна та якісна обробка експертних даних значною мірою визначає коректність і правильність виконання експертизи інформації.

Ключові слова: інформація; критерії; експерт; метод; оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Відповідно до Закону України “Про державну таємницю” експертне оцінювання секретної інформації на даний час є одним із основних методів, який використовується на практиці державними експертами з питань таємниць [1]. Метод експертних оцінок знайшов своє відображення в працях багатьох науковців як найбільш універсальний та найефективніший для проведення аналізу інформації. Його також використовують для вирішення широкого спектра завдань управління, прогнозування, планування в соціології, науці та техніці. Сфера застосування експертного оцінювання постійно розширюється: визначення параметрів і структури складних систем, особливо тих, що не мають достатньої передісторії функціонування

і характеризуються високим рівнем структурно-параметричної невизначеності (складних соціально-економічних систем, систем проєктного менеджменту, систем захисту інформації тощо).

Відсутність загально визнаних формально-теоретичних і методичних положень, що пояснюють механізм формування експертних даних (зокрема і похибок у них) обумовлює той факт, що загальні рекомендації щодо їх обробки, а тим більше у формі програмного продукту, на сьогодні не реалізовані. Спеціаліст, який використовує експертні дані, як правило, сам приймає рішення щодо порядку їх обробки. Математичні методи обробки, що застосовуються, є прийнятними для розуміння даного процесу, а використання більш складних методик обробки потребує отримання додаткової інформації, зазвичай відсутньої. Постає актуальна проблема обробки експертних даних, яка зосереджена тільки на суб'єктивному твердженні особи (осіб) під час оцінювання інформації. Отже, розроблення методу визначення похибок експертних даних у ході оцінювання інформації є актуальним науковим завданням, вирішення якого дасть змогу підвищити точність результатів оцінювання за одночасної мінімізації ступеня суб'єктивізму в одержуваних оцінках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Головним питанням практичного застосування поняття “цінність інформації” є знаходження (обчислення) кількісної оцінки її цінності. Дане питання, яке потребує практичного рішення, є актуальним і в наш час, а особливо в сфері оцінювання інформації. Проведенню досліджень у даній сфері присвячено значну кількість наукових публікацій, зокрема, роботи В. В. Єрмошина, О. Г. Пузиренка, О. Є. Архипова, О. Є. Муратова, В. В. Михайлова [2–6] тощо. Проведений аналіз відомих джерел дозволяє стверджувати, що підходи та методи для визначення цінності інформації носять переважно суб'єктивний характер, що обумовлено, зокрема, різноманіттям інформаційних систем, де обробляється або циркулює інформація, яка підлягає оцінюванню, та особливостями прикладних задач, для розв'язку яких вона застосовується. На даний час у працях вітчизняних та закордонних науковців досліджуються питання діяльності експертних груп та застосування експертного оцінювання для розв'язання широкого кола завдань, зокрема прогнозування загроз інформаційній безпеці держави. Аналіз наукових результатів дає можливість їх використання з метою удосконалення методичного забезпечення діяльності експертів (експертних комісій) під час проведення державних експертиз із питань таємниць.

Формулювання завдання дослідження. Найбільш поширеними методами, які ґрунтуються на використанні експертних оцінок, є індивідуальні (персональні) та групові (колективні). Методи індивідуальних експертних оцінок, у свою чергу, діляться на аналітичні експертні оцінки, інтерв'ю, парні порівняння та інші. До методів колективної оцінки, відповідно, належить метод комісії, методи Дельфі та Паттерн тощо.

Вибір методу індивідуальних або колективних експертних оцінок проводиться залежно від типу (виду) оцінюваної інформації та необхідного результату експертизи. Висновки одного експерта складаються із суб'єктивної оцінки інформації, а результати роботи групи експертів визначаються шляхом інтеграції індивідуальних експертних оцінок.

Одним із завдань експертизи інформації є вибір критеріїв оцінювання для формування кінцевого результату. Наприклад, експертизи за методом Дельфі вимагають проведення значної організаційної роботи, що, у свою чергу, дозволяє отримати якісні й надійні результати. З метою підвищення оперативності оброблення експертних даних фахівці надають перевагу простим експертизам, при цьому необхідна якість їх результатів забезпечується проведенням апостеріорної математичної обробки вихідних оцінок. Разом з тим під час оцінювання інформації експерт з державних таємниць (ДТ) визначає рівень потенційної загрози та формує критерії, що може безпосередньо впливати на національну безпеку держави. У зв'язку з тим, що переважну більшість експертиз проводить експерт, а не група експертів, то в таких оцінках присутній високий рівень похибок.

Для усунення даної суперечності між теорією і практикою оцінювання експертних даних необхідно розробити математичний апарат визначення похибок експертних даних у ході оцінювання інформації.

Виклад основного матеріалу. Одним із ключових питань обробки експертних даних є визначення рівня показника компетентності експертів та його урахування для кінцевої обробки висновків експертизи. Для встановлення чисельності експертів у групі можна використати залежність граничної величини ступеня відмінності думок окремих експертів [7]. Є деяка емпірична залежність, яка визначає зв'язок між кількістю експертів у групі E_n та величиною групової середньої похибки G_r (рис. 1).

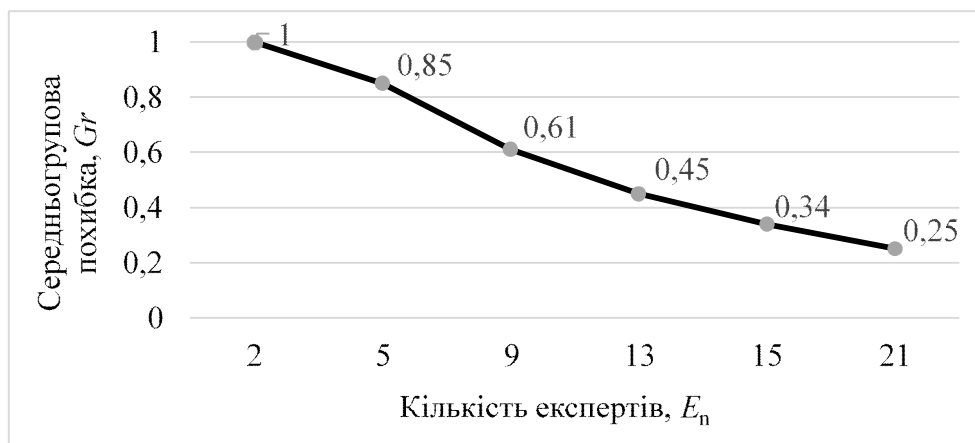


Рис. 1. Залежність величини похибки від кількості експертів

Використання такої залежності на практиці дозволяє обирати мінімально допустиму кількість експертів відповідно до рівня достовірності, який необхідний для прийняття рішень.

Припустимо, що мета експертизи – визначення рівня важливості інформації, яка міститься в досліджуваних об'єктах, наданих для експертизи, наприклад, трьох: $П_1, П_2, П_3$. Кожен із них експерти E_1, \dots, E_n оцінюють у кількісній шкалі $0, \dots, L$ балів. Найбільш критичному оцінюваному об'єкту присвоюється максимальна кількість балів. За результатами групової експертизи кожний з об'єктів отримує певну суму балів [8]

$$Q_i = \sum_{i=1}^n q_{ii} \quad (1)$$

або відповідний середній бал

$$q_{it} = \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n q_n = \frac{1}{n} Q, \quad (2)$$

де q_{it} – оцінка, яку дав експерт E_i , $i = \overline{1, n}$, досліджуваному об'єкту Π_t , $t = \overline{1, 3}$.

Якщо до уваги не приймати рівні компетенції експертів, важливим буде об'єкт експертизи з найбільшою сумою балів Q або з найвищим середнім балом \bar{q} .

Врахування компетентності експертів у подібній ситуації найчастіше реалізується шляхом введення спеціальних вагових коефіцієнтів ω_i , значення яких залежать від рівня компетенції C_i відповідного експерта. Звичайно, на сукупність вагових коефіцієнтів накладається так звана "вимога незміщеності"

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \quad (3)$$

зміст якої полягає в тому, що в разі, коли всі експерти дали об'єкту оцінювання однакову оцінку q , зважений середній бал збігається із цією ж оцінкою:

$$\bar{q}_t = \sum_{i=1}^n \omega_i q_{it} = q \sum_{i=1}^n \omega_i = q. \quad (4)$$

Щоб вага ω_i залежала від C_i й одночасно виконувалася вимога незміщеності (3), значення ω_i розраховуємо за формулою

$$\omega_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^n C_j}. \quad (5)$$

Зазначимо, що середньозважений бал \bar{q}_t можна знайти за такою формулою:

$$e_{ij} = (z_{ij} - med_i) / l_{max}, \quad (6)$$

де $Q_t^{(k)}$ – сумарний бал, отриманий t -м об'єктом із врахуванням рівня компетентності C_i , $i = \overline{1, n}$.

Рішення у визначенні рівнів компетентності експертів полягає в суміщенні обох наведених вище методів шляхом побудови моделі компетентності експертів, яка пов'язує оцінки усередненої компетентності Z_i з об'єктивними документованими даними про експертів. При цьому вважаємо, що

$$\bar{Z} = C + \xi, \quad (7)$$

де ξ – суб'єктивна похибка в оцінці рівня компетентності експерта. Визначаємо рівень компетенції відповідного експерта за формулою

$$C = \bar{Z} - \xi, \quad (8)$$

де C – значення рівня компетенції відповідного експерта.

Після підстановки у вираз (7) $\bar{Z} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + \xi$ останній набуває форми лінійної регресії, єдиною відмінністю якої від раніше розглянутих є гетероскедастичність залежної змінної \bar{Z} , тобто несталість її дисперсії оцінок $D\{\bar{Z}\}$. Після розрахунків дисперсії оцінок $Z_i, i = 1, n$, отриманих кожним з експертів за виразом

$$D\{\bar{Z}\} = \sigma_z^2 \approx \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [Z(E_j) - Z_i]^2, \quad (9)$$

можна переконатися, що вони мають розбіжності. Відповідні дисперсії усереднених значень у n разів менші, однак відносний рівень розбіжності даних значень залишиться без змін. Вектор регресійних коефіцієнтів у цьому разі оцінюється за формулою

$$\tilde{A} = (X^T W X)^{-1} X^T W Z, \quad (10)$$

де W – вагова матриця, $W = D^1$,

$$D = \begin{pmatrix} D\{\bar{Z}_1\} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D\{\bar{Z}_2\} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & D\{\bar{Z}_n\} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Інший спосіб розрахунку вектора \tilde{A} є переходом до зваженої регресії [9]:

$$V = a_1u_1 + a_2u_2 + \dots + a_ku_k + v, \quad (12)$$

коефіцієнти якої обчислюються звичайним методом найменших квадратів із перевизначеної системи зважених рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\bar{Z}_1}{\sqrt{D\{\bar{Z}_1\}}} = a_1 \frac{x_{11}}{\sqrt{D\{\bar{Z}_1\}}} + \dots + a_k \frac{x_{1k}}{\sqrt{D\{\bar{Z}_1\}}} + \frac{\xi_1}{\sqrt{D\{\bar{Z}_1\}}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{Z}_n}{\sqrt{D\{\bar{Z}_n\}}} = a_1 \frac{x_{n1}}{\sqrt{D\{\bar{Z}_n\}}} + \dots + a_k \frac{x_{nk}}{\sqrt{D\{\bar{Z}_n\}}} + \frac{\xi_n}{\sqrt{D\{\bar{Z}_n\}}} \end{cases}. \quad (13)$$

Враховуючи, що $\sqrt{D\{\bar{Z}_i\}} = \sqrt{\frac{1}{n} D\{Z_i\}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sigma_{z_i}$, де множник $\frac{1}{n}$ можна винести з-під радикала, у знаменниках системи (13) отримуємо зважування вихідних даних у векторно-матричній формі:

$$V = T^{-1} \bar{Z} = \begin{vmatrix} \bar{Z}_1 / \sigma_{Z1} \\ \dots \\ \bar{Z}_n / \sigma_{Zn} \end{vmatrix}; \quad (14)$$

$$U = T^{-1} X = \begin{vmatrix} x_{11} / \sigma_{Z1} & \dots & x_{1k} / \sigma_{Z1} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} / \sigma_{Zn} & \dots & x_{nk} / \sigma_{Zn} \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$T = T^T = \begin{vmatrix} \sigma_{Z1} & 0 \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{Z2} \dots & 0 \\ 0 & 0 \dots & \sigma_{Zn} \end{vmatrix}; \quad (16)$$

$$T^{-1} = \begin{vmatrix} 1 / \sigma_{Z1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 / \sigma_{Z2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 / \sigma_{Zn} \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Після зважування елементи вектора $V^T = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ мають однакову дисперсію, тобто це гомоскедастична змінна, а коефіцієнти регресії (12) визначають як традиційні оцінки методу найменших квадратів [10, 11]:

$$\tilde{A} = (U^T U)^{-1} U^T V. \quad (18)$$

Після побудови моделі залежності рівня компетентності експертів від їх особових документованих даних можна визначити відповідні набори значень регресорів $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}]$ та знайти оцінки компетентності $\tilde{C}_i = X_i \tilde{A}$ експертів E_i , $i = \overline{1, n}$. Наступним кроком проводимо розрахунки результатів експертизи, тобто знаходимо q_t або $Q_i^{(k)}$, $t = \overline{1, 3}$, зважаючи на важливість кожного з об'єктів експертизи.

Проаналізувавши результати експертних технологій, які використовують для оцінювання рівня шкоди, заподіяної внаслідок розголошення інформації, доцільно зосередитися на методі колективної експертизи – багатооб'єктній експертизі (БОЕ). У ній бере участь група з N експертів, кожен з яких здійснює індивідуальну експертизу M об'єктів, що складають відповідну сукупність. Отримані в ході індивідуальних експертиз підмножини з M експертних оцінок зводяться в загальну матрицю даних, які підлягають подальшій спільній обробці [12]:

$$Z = [Z_{ij}] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{M1} & Z_{M2} & \dots & Z_{MN} \end{bmatrix} = [Z_1, Z_2, \dots, Z_N]. \quad (19)$$

Особливістю БОЕ є достатньо великі обсяги M об'єктів, що підлягають експертизі, з урахуванням критеріїв, які визначаються для оцінювання інформації. Прикладом БОЕ є робота постійно діючих груп експертів (комісій), що є фахівцями у визначеній сфері, вони проводять експертизу конкретного класу інформації.

Застосовуючи принцип кластерного аналізу [13], введемо поняття образу експерта як деякої точки $Z_j = [z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{Mj}]^T$, $j = \overline{1, N}$, у M -вимірному просторі результатів БОЕ. У разі повного збігу оцінок експертів їхні образи однакові, тобто всі результати експертизи будуть описані єдиною точкою в просторі результатів БОЕ. Наявні помилки експертів призводять до розсіювання точки в хмару (кластер), щільність якої неоднорідна і зазвичай максимальна в області, що прилягає до центра кластера з координатами $Z_0 = [z_{10}, z_{20}, \dots, z_{M0}]^T$, визначеними співвідношенням [14]:

$$Z_0 = \operatorname{argmin}_{Z_j, Z_0 \in R^M} \sum_{j=1}^N r_j(Z_j, Z_0), \quad (20)$$

де $r_j(Z_j, Z_0)$ – відстань між образом j -го експерта і центром Z_0 кластера в M -вимірному просторі R^M результатів БОЕ. У разі використання для знаходження $r_j(Z_j, Z_0)$ евклідової метрики

$$r_j = r_j(Z_j, Z_0) = \left[\sum_{i=1}^M (z_{ij} - z_{i0})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, j = \overline{1, N}, \quad (21)$$

мінімізація співвідношення (20) досягається за

$$z_{i0} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N z_{ij}. \quad (22)$$

Наявність аномальних даних у рядках матриці Z спричиняє зміщення оцінок (22), у зв'язку з чим більш надійний результат (за ймовірної наявності так званих “аномальних” експертів (АЕ) дає застосування медіанних такого вигляду:

$$z_{i0} = \operatorname{med}(Z_1) = \operatorname{med}(z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iN}). \quad (23)$$

У разі відсутності АЕ справедливе припущення про рівність нулю математичних сподівань помилок експертизи $\mu\{E_j\} = 0$, $j = \overline{1, N}$, що підтверджує виконання рівності $\mu\{Z_0\} = X_0 = [x_{10}, x_{20}, \dots, x_{M0}]^T$ і дозволяє обґрунтувати гіпотезу незміщеності середньогрупових експертних оцінок:

$$\mu\{\bar{Z}_i\} = \mu\left\{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_{ij}\right\} = \frac{1}{N} \mu\left\{\sum_{j=1}^N (x_{i0} + e_{ij})\right\} = \frac{1}{N} (Nx_{i0}) = x_{i0}. \quad (24)$$

Метризація віддаленості образів експертів від центра Z_0 дозволяє подати в інтегрованій формі інформацію про помилки кожного з експертів і допускає можливість існування шкального перетворення $c_j = f(r_j)$, що забезпечує взаємооднозначне відображення елементів множини R ($r_j \in R, j = \overline{1, N}$) у відповідні оцінки компетентності експертів $f: R \rightarrow C; c_j \in C$.

Розглянемо досить розповсюджену на практиці процедуру БОЕ, у якій використовується бальне оцінювання.

Якщо процедура БОЕ полягає в оцінюванні кожного з об'єктів експертизи в бальній шкалі $0, 1, 2, \dots, l_{\max}$, тобто $z_{ij} \in \{0, 1, \dots, l_{\max}\} = L$, то теоретично можливими мінімальними й максимальними значеннями $r \in r_{\min} = 0$ і $r_{\max} = l_{\max} \sqrt{M}$. Підставивши у вираз (21) нормуючі множники $1/l_{\max}$ та $1/\sqrt{M}$, отримуємо формулу для обчислення нормованої відстані образу j -го експерта від центра кластера Z_0 :

$$r_{mj} = r_j (l_{\max} \sqrt{M}). \quad (25)$$

Нормована відстань не залежить від кількості M об'єктів, що підлягають експертизі, і кількості визначень бальної шкали, тобто від $\max l$, будучи індивідуалізованою оцінкою експерта, що враховує тільки величину і характеристики розподілу помилок експерта. Досвід практичної роботи з даними БОЕ свідчить, що значення $r_H \leq 0,2$ характерні для експертів досить високої кваліфікації, значення $r_H \geq 0,3 \dots 0,35$ вказують на присутність аномальних даних в оцінках експерта, область значень $0,2 \leq r_H \leq 0,3 \dots 0,35$ відповідає образам експертів, що мають відносно невисокий рівень професійної підготовки, нерівномірно проводять експертизу і допускають у своїх оцінках суттєві помилки. Типовий розподіл сукупності значень r_H для групи експертів наведено на (рис. 2).

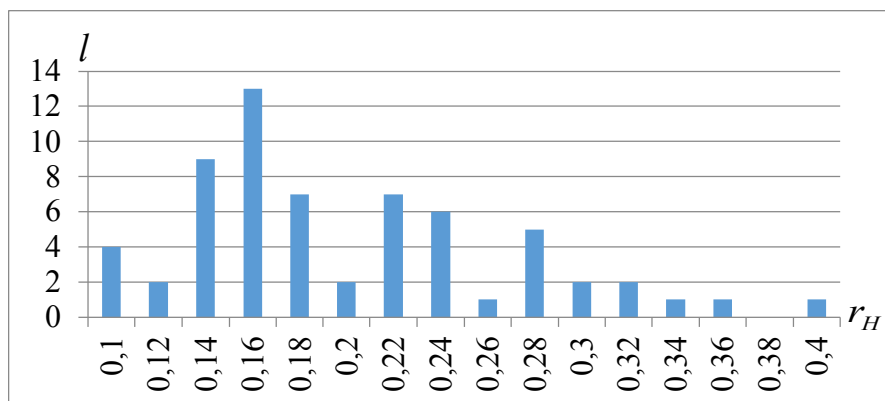


Рис. 2. Типовий розподіл сукупності

Наприклад, форма залежності $c = f(r_H)$ може бути близька до східчастої (релейної),

що дозволяє розв'язати задачу визначення неналежної кваліфікації фахівців і аномальних експертів. Альтернатива – залежність $c = f(r_H)$, яка задає досить гладке й плавне (майже лінійне) перетворення у відносно широкому діапазоні значень r_H . Зокрема, подібну характеристику шкальному перетворенню забезпечують такі значення параметрів: $b_0 = 15$, $B = 0,967$. У цьому разі безпосереднє виявлення й виключення з обробки даних АЕ відсутнє, однак у ході обробки із введенням вагових коефіцієнтів, пропорційних компетентності експертів, ефективність оцінки, наданої експертом, наближається до нуля, за умови $r_H > 0,4$.

Завдання параметрів шкального перетворення містить істотний суб'єктивний момент та визначається: цілями перетворення, особливостями прийнятої моделі розподілу похибок оцінок експертизи, застосуванням способом кількісного оцінювання рівня компетентності (бальна шкала, шкала з однобічним обмеженням, шкала із двобічним обмеженням).

Величина і характер помилок, які допускаються експертом у ході експертизи, визначаються винятково рівнем його компетентності, що робить правомірним припущення, відповідно до якого оцінка компетентності j -го експерта може бути знайдена безпосередньо з відомостей про характеристики його помилок, зокрема, з вибірових моментних характеристик послідовності $E_j = \{e_{1j}, e_{2j}, \dots, e_{Mj}\}$. Розрахунки, виконані для реальних даних, показали обґрунтованість даного припущення. Оцінки компетентності, знайдені для сукупності експертів, визначено шляхом перерахування оцінок $r_{H,j}$ за формулою

$$c = f(r_H) = (0,033e^{15r} + 0,967)^{-1}, \quad (26)$$

одержаною із загального співвідношення (20) після підстановки в нього параметрів $b_0 = 15$, $B = 0,967$. Результати практично збігаються з оцінками компетентності для цих же експертів, обчисленими за апроксимуючою моделлю:

$$c(x_1, x_2, x_3) = 1 - 11,6x_3 = 50x_1x_3 + 40x_2^2, \quad (27)$$

де x_1, x_2, x_3 – відповідно вибірові оцінки моментних характеристик послідовності E_j : середнього \bar{e} , дисперсії σ^2 і другого початкового моменту v_2 , – розраховані за даними експертизи, виконаної кожним експертом.

Вираз (27) дає можливість кількісно оцінити рівні компетентності кожного з експертів, що брали участь у БОЕ, не вдаючись до попереднього обчислення нормованої відстані r_H . Для відповідного j -го експерта вектора оцінок погрешностей експертизи E_j , $j = \overline{1, N}$, на першому етапі обчислюють вибірові значення моментних характеристик \bar{e}, σ^2, v_2 (змінних x_1, x_2, x_3), на другому за формулою (27) розраховують відповідні рівні компетентності.

Розрахунок елементів вектора E_j проводять за формулою

$$e_{ij} = (z_{ij} - med_i) / l_{max}, \quad (28)$$

де med_i – медіана i -го рядка матриці Z (19).

Модель (27) – звичайна лінійна (за параметрами) регресія, побудована за даними, отриманими в ході обробки результатів експертизи (19).

Розглянемо нижче приклад побудови апроксимуючої моделі за такою методикою.

Характеристики похибок певного моменту часу в оцінках експертів утворюють матрицю $X = [X_1, X_2, X_3]$ незалежних змінних, $X_t = [x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tN}]^T$, $t=1,2,3$, де $[\dots]^T$ – символ транспонування. Зокрема, характеристики певного моменту часу $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{3j}$ j -го експерта утворюють j -й рядок матриці X . Розраховані за тими ж вихідними даними (матриця Z) за допомогою формул (21), (26) значення компетентностей c_j , $j = \overline{1, N}$, утворюють вектор C значень залежної змінної. На базі сформованої у такий спосіб розширеної матриці даних $[C, X_1, X_2, X_3]$ із застосуванням методів та прийомів регресійного аналізу (зокрема, крокової регресії для підбору структури регресії та методу найменших квадратів для обчислення регресійних коефіцієнтів) будується модель (27).

Висновки. Імовірність виникнення суб'єктивних помилок, що впливають на кінцевий результат в індивідуальних (персональних) експертних оцінках, вимагає застосування методу групових (колективних) експертиз, що, у свою чергу, обумовлює необхідність розроблення спеціальних методик обробки даних групових експертиз. Запропонована методика передбачає визначення індивідуальних рівнів компетентності задіяних експертів, у зв'язку з чим виникає потреба в проведенні додаткового визначення критеріїв оцінки інформації.

Набув подальшого розвитку метод комплексного визначення похибки оцінювання рівня небезпеки загрози за даними експертної оцінки, що дозволяє підвищити точність результатів оцінювання за одночасної мінімізації ступеня суб'єктивізму в одержаних результатах. Запропонований метод визначення похибок експертних даних у ході оцінювання інформації на практиці дозволяє підвищувати точність отримуваних результатів. При цьому мінімізація ступеня суб'єктивізму в одержуваних оцінках досягається за рахунок визначення компетентності рівня експертів під час проведення процедури оцінювання інформації.

Запропонований метод визначає рівень компетентності експертів, який ґрунтується на оцінці суб'єктивних похибок, що дозволяє підвищити ефективність проведення БОЕ інформації.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Про державну таємницю: Закон України станом на 24 листопада 2021 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3855-12> (дата звернення: 01.09.2021).
2. Єрмошин В. В., Невойт Я. В. Аналіз і оцінка ризиків інформаційної безпеки для банківських та комерційних систем // Сучасний захист інформації. 2014. № 4. С. 12–22.
3. Методика кількісно-якісного аналізу та визначення рівня інформаційної безпеки / О. Г. Пузиренко, О. Ю. Іохов, О. М. Горбов, І. В. Кузьминич // Системи озброєння і військова техніка. 2013. № 1. С. 123–128.
4. Архипов О. Є., Касперський І. П. Застосування методології передбачення для оцінювання шкоди, заподіяної витоком секретної інформації // Правове, нормативне та

метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Київ. 2007. Вип. 2 (15). С. 13–19.

5. Муратов О. Є. Важливість інформації та шкода від втрати інформації у питаннях забезпечення інформаційної безпеки організації // Зб. матеріалів наук.-практ. конф. "Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави". (17 березня 2010 р., м. Київ). Київ : НВВ НА СБ України, 2010. С. 66–69.

6. Михайлов В. В., Муратов О. Є. Запобігання шкоди національній безпеці України – передбачений законодавством привід до засекречування інформації // Зб. тез доповідей ІV наук.-практ. конф. "Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні". (1–3 березня 2006 р.). Київ : ЕКМО, 2006. С. 31.

7. Афоничкин А. И., Михаленко Д. Г. Управленческие решения в экономических системах : учебн. для вузов. Санкт-Петербург : Питер, 2009. 480 с.

8. Петренко С. А., Симонов С. В. Управление информационными рисками. Экономически оправданная безопасность. Москва : ДМК Пресс, 2004. 308 с.

9. Литвак Б. Г. Разработка управленческого решения. Москва : Дело, 2000. 392 с.

10. Багатокритерійні математичні моделі ситуаційного управління та самоорганізація у складних інформаційних системах : монографія / О. В. Лагодний та ін. Житомир : ПП "Рута", 2016. 232 с.

11. Лагодний О. В., Писарчук О. О., Міхеев Ю. І. Статистичний аналіз активності тематичного контенту в мережі Інтернет для прогнозування розвитку інформаційних загроз // *Trajectoriâ Nauki = Path of Science*. 2017. Vol. 3, No. 8. P. 3011–3019. URL: <http://pathofscience.org/index.php/ps/article/view/376>. ISSN 2413-9009. DOI: 10.22178/pos.25-2

12. Архипов О. Є., Архипова А. С. Оцінювання якості роботи експертів за даними багатооб'єктної експертизи // *Захист інформації*. 2011. № 4 (53). С. 45–54.

13. Архипов А. Е., Архипова С. А., Носок С. А. Технологии экспертного оценивания в задачах защиты информации // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2005. № 2. С. 89–94.

14. Архипов А. Е., Архипова С. А., Носок С. А. Применение кластерного анализа для структурирования данных экспертного опроса // *Адаптивные системы автоматического управления*. 2003. № 6 (26). С. 55–61.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021.

REFERENCES

1. Pro derzhavnu taiemnytsiu : Zakon Ukrainy stanom na 24 lystopada 2021 roku [On State Secrets: Law of Ukraine as of November 24, 2021]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3855-12> [in Ukrainian].

2. Yermoshyn, V. V., & Nevoit, Ya. V. (2014). Analiz i otsinka ryzykiv informatsiinoi bezpeky dlia bankivskykh ta komertsiinykh system [Analysis and assessment of information security risks for banking and commercial systems]. *Suchasnyi zakhyst informatsii [Modern information protection]*, 4, 12–22 [in Ukrainian].

3. Puzyrenko, O. H., Iokhov, O. Yu., Horbov, O. M., & Kuzmynych, I. V. (2013). Metodyka kilkisno-iakisnoho analizu ta vyznachennia rivnia informatsiinoi bezpeky [Methods of

- quantitative-qualitative analysis and determination of the level of information security]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika [Weapons systems and military equipment]*, 1, 123–128 [in Ukrainian].
4. Arkhypov, O. Ye., & Kasperskyi, I. P. (2007). Zastosuvannia metodolohii peredbachennia dlia otsiniuvannia shkody, zapodiianoii vytkom sekretnoi informatsii [Application of prediction methodology for assessing the damage caused by leakage of classified information]. *Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennia systemy zakhystu informatsii v Ukraini [Legal, regulatory and metrological support of the information protection system in Ukraine]*, 2 (15), 13–19 [in Ukrainian].
5. Muratov, O. Ye. (2010). Vazhlyvist informatsii ta shkada vid vtraty informatsii u pytanniakh zabezpechennia informatsiinoi bezpeky orhanizatsii [Importance of information and harm from loss of information in matters of information security of the organization]. In *Zb. materialiv nauk.-prakt. konf. "Aktualni problemy upravlinnia informatsiinoiu bezpekoiu derzhavy" [Coll. materials of scientific practice conf. "Current issues of information security management of the state"]*. Kyiv, March 17, 2010. (pp. 66–69). Kyiv: NASSU [in Ukrainian].
6. Mykhailov, V. V., & Muratov, O. Ye. (2006). Zapobihannia shkody natsionalnii bezpetsi Ukrainy – peredbachenyi zakonodavstvom pryvid do zasekrechuvannia informatsii [Prevention of damage to the national security of Ukraine - a reason provided by law for the secrecy of information]. In *Zb. tez dopovidei IV nauk.-prakt. konf. "Pravove, normatyvne ta metrolohichne zabezpechennia systemy zakhystu informatsii v Ukraini" [Coll. abstracts of reports IV scientific-practical conf. "Legal, regulatory and metrological support of the information protection system in Ukraine"]*. Kyiv, March 1–3, 2006. (P. 31). Kyiv: EKMO [in Ukrainian].
7. Afonichkin, A. I., & Mikhalenko, D. G. (2009). *Upravlencheskie resheniia v ekonomicheskikh sistemakh [Management decisions in economic systems]*. Saint Petersburg [in Russian].
8. Petrenko, S. A., & Simonov, S. V. (2004). *Upravlenie informatsionnymi riskami. Ekonomicheski opravydanaia bezopasnost' [Information risk management. Economically justified security]*. Moscow [in Russian].
9. Litvak, B. G. (2000). *Razrabotka upravlencheskogo resheniia [Development of a management solution]*. Moscow [in Russian].
10. Lahodnyi, O. V. et al. (2016). *Bahatokryteriini matematychni modeli sytuatsiinoho upravlinnia ta samoorhanizatsiia u skladnykh informatsiinykh systemakh [Multicriteria mathematical models of situational management and self-organization in complex information systems]*. Zhytomyr [in Ukrainian].
11. Lahodnyi, O. V., Pysarchuk, O. O., & Mikhieiev, Yu. I. (2017). Statystychnyi analiz aktyvnosti tematychnoho kontentu v merezhi Internet dlia prohnozuvannia rozvytku informatsiinykh zahroz [Statistical analysis of the activity of thematic content on the Internet to predict the development of information threats]. *Traektoriâ Nauki = Path of Science [Trajectory of Science = Path of Science]*, Vol. 3, № 8, 3011–3019. <https://doi.org/10.22178/pos.25-2> [in Ukrainian].
12. Arkhypov, O. Ye., & Arkhypova, A. C. (2011). Otsiniuvannia yakosti roboty ekspertiv za danymy bahatoob'iektnoi ekspertyzy [Evaluation of the quality of work of experts according to the data of multi-object examination]. *Zakhyst informatsii [Information protection]*, 4 (53), 45–54 [in Ukrainian].

13. Arkhipov, A. E., Arkhipova, S. A., & Nosok, S. A. (2005). Tekhnologii ekspertnogo otsenivaniia v zadachakh zashchity informatsii [Expert evaluation technologies in information security problems]. *Informatsiini tekhnologii ta komp'iuterna inzheneriia [Information technologies and computer engineering]*, 2, 89–94 [in Russian].
14. Arkhipov, A. E., Arkhipova, S. A., & Nosok, S. A. (2003). Primenenie klasternogo analiza dlia strukturovaniia dannykh ekspertnogo oprosa [Application of cluster analysis for structuring expert survey data]. *Adaptivnye sistemy avtomaticheskogo upravleniia [Adaptive systems of automatic control]*, 6 (26), 55–61 [in Russian].

O. V. Lahodnyi, I. P. Mordas, V. O. Pavlenko

METHOD FOR DETERMINING ERRORS IN EXPERT DATA DURING EVALUATION OF INFORMATION

According to art. 8 the Act of Ukraine “On State secrets” includes information on defence, the economy, science and technology, foreign relations, state security and law enforcement. The inclusion of information in the above-mentioned are as realizes only the necessary conditions for classifying such information as secret. The final decision on restricting access to information shall be taken on the basis of an assessment of the level of damage that may be caused to the national security of Ukraine in the event of the disclosure of information, and the appropriateness of such a decision on the part of the State expert on secrecy. In accordance with the requirements of the laws and regulations, the conditions for classifying information as a State secret are complex and are determined on the basis of the criteria for possible damage to the national security of Ukraine as a result of the disclosure of such information, and the criteria for secrecy.

When using the expert assessment method, the expert determines the criteria by which the information is evaluated to determine the level of damage to Ukraine’s national security. These criteria are based on the expert’s subjective judgement, that is, the determination of qualitative estimates of information. On the basis of the above, expert methods are based solely on the assessments made by experts on the object of assessment, which they have thoroughly examined. In such a case, the way information is evaluated remains clearly uncertain and not sufficiently quantified.

Quantitative assessments of the information make it possible to objectively assess the level of harm to Ukraine’s national security and to minimize the level of subjectivity during this process. The results of this work can be implemented in the form of a specialized software module to determine the level of competence of the person participating in the information assessment procedure.

So, efficient and high-quality processing of expert data to a large extent determines the correctness and correctness of the information analysis.

Keywords: *information; criteria; expert; method; evaluation.*

О. П. Гребенюк, М. А. Роговець, О. О. Гребенюк

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ ОБРОБКИ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ Й ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ КОМПЛЕКСІВ РАДІОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ

У статті досліджено питання щодо покращення рівня завадозахищеності в системах зв'язку і передачі даних комплексів радіомоніторингу.

Актуальність даного завдання обумовлена складністю сучасної радіоелектронної обстановки, яка характеризується високою динамічністю та насиченістю радіоелектронними засобами, що працюють на випромінювання та здійснюють взаємний вплив, а також важливістю завдань, які виконують підрозділи радіомоніторингу військового призначення.

У роботі запропоновано застосування алгоритму багатоканальної вагової просторової обробки сигналів на фоні завад для покращення завадозахищеності систем зв'язку і передачі даних на базі радіорелейної станції «Р-415В». Даний підхід є найбільш раціональним, оскільки компенсація діючих завад здійснюється за умови наявності просторових відмінностей між напрямками приходу корисного сигналу і завади, що є характерним для радіорелейних станцій. Крім того, технічною передумовою реалізації запропонованого рішення є наявність у складі радіорелейної станції «Р-415В» спрямованої антени «ДБІІ», що складається з двох однакових z-випромінювачів і є найпростішою двоелементною антенною решіткою, яку можна використати для реалізації багатоканальної вагової обробки.

У статті наведено алгоритм просторової обробки, обрано показники ефективності та досліджено ефективність його роботи. Розрахунки проводилися з використанням системи комп'ютерної алгебри – Mathcad 15.

Отримано наочні, кількісні та якісні результати показників ефективності залежно від обраної радіоелектронної обстановки для визначених тактико-технічних характеристик засобу передачі інформації без урахування впливу дестабілізуючих факторів на якість обробки.

Ключові слова: радіомоніторинг; завадозахищеність; вагова просторова обробка; компенсація завад; система зв'язку і передачі даних.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На системи радіомоніторингу (РМ) цивільного і військового призначення покладається виконання важливих завдань, основними з яких є:

- спостереження та контроль за частотним діапазоном;
- виявлення джерел радіовипромінювання (ДРВп);
- визначення їх місцеположення тощо.

Виконання цих завдань реалізується шляхом управління через системи зв'язку і передачі даних (СЗіПД). Однією з основних характеристик СЗіПД, що обумовлює їх ефективне функціонування в складі комплексів РМ, є завадостійкість системи, яка

забезпечує достовірність інформаційного обміну [1]. Слід зазначити, що сучасна радіоелектронна обстановка (РЕО) є складною, характеризується високою насиченістю радіоелектронних засобів (РЕЗ), що використовують спільний частотний діапазон, розміщуються на обмеженій відстані та, як наслідок, здійснюють взаємний вплив. Крім того, сучасні комплекси РМ функціонують в умовах впливу завад. Усе це призводить до зменшення їх ефективності функціонування [2, 3]. У зв'язку з викладеним вище набуває актуальності завдання покращення рівня завадозахищеності СЗіПД засобів РМ як показника, що визначає здатність функціонування за призначенням без погіршення робочих характеристик у разі дії завад. Відсутність спеціальних технічних рішень щодо компенсації дії завад робить важливим дослідження можливості покращення рівня завадозахищеності радіорелейної станції (РРС) «Р-415В», на основі якої реалізовано СЗіПД сучасних комплексів РМ військового призначення. Актуальності дана проблема набула під час проведення антитерористичної операції (операції Об'єднаних сил).

Отже, є суперечність, пов'язана з необхідністю реалізації надійного зв'язку та достовірної передачі інформації СЗіПД комплексів РМ військового призначення в умовах складної сучасної РЕО при їх низькому рівні завадозахищеності. Один із методів покращення завадозахищеності СЗіПД – застосування вагової просторової обробки сигналів і завад.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню проблеми виконання завдань РМ в умовах складної сигнальної обстановки присвячено значну кількість наукових праць. У контексті даної статті заслуговують на увагу наукові праці [4, 5, 8]. У них розкрито загальні підходи до компенсації завад у РЕЗ та засобах зв'язку. Застосування адаптивної просторової вагової обробки як однієї із сучасних радіотехнологій для забезпечення завадостійкості військової техніки радіозв'язку розглянуто в [6]. Вплив навмисних завад на завадозахищеність СЗіПД комплексів РМ досить повно досліджено в [1], проте наведено розрахунки ефективності СЗіПД для передач на основі сигналів із частотною маніпуляцією із завадостійким кодуванням. Можливості використання просторової обробки в СЗіПД комплексів РМ військового призначення не досліджувалися.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є оцінювання можливості застосування вагової просторової обробки в СЗіПД комплексів РМ для покращення завадозахищеності.

Виклад основного матеріалу. Для надійних умов функціонування системи РМ та її складових створюється СЗіПД. Це сукупність взаємопов'язаних та узгоджених за завданнями, місцем і часом дій вузлів (центрів, пунктів, станцій) і ліній зв'язку, які розгортаються (створюються) за єдиним задумом і планом для забезпечення завдань управління. Слід зазначити, що СЗіПД у ході виконання завдань РМ використовують не тільки для передачі розпоряджень, команд та оперативної інформації, а також як невід'ємну частину засобів (комплексів) радіо- та радіотехнічного моніторингу. Так, наприклад, під час визначення місцеположення ДРВп СЗіПД на базі РРС «Р-415В» здійснюється управління елементами комплексу засобів синхронного пеленгування, яке полягає в синхронізації роботи пеленгаторів у процесі визначення пеленгів на ДРВп [1].

Для покращення завадозахищеності РРС «Р-415В» в умовах дії активних завад (АЗ) заслуговує на увагу дослідження можливості вдосконалення даного зразка шляхом застосування методу просторової компенсації АЗ [4]. Технічною передумовою реалізації

цього підходу є наявність у складі РРС «Р-415В» спрямованої антени «ДБ11», що складається з двох однакових z-випромінювачів. Це найпростіша двоелементна антенна решітка (див. рис. 1а), яку можна використати для реалізації багатоканальної вагової обробки сигналів на фоні дій АЗ без виділеного каналу прийому [7].

Відомо, що багатоканальні системи компенсації забезпечують подавлення АЗ, кількість яких становить $M-1$, де M – кількість каналів обробки [8]. Отже, конструктивне виконання антени «ДБ11» РРС «Р-415В» у вигляді двоелементної антенної решітки (АР) теоретично створює передумови щодо компенсації однієї АЗ. У разі збільшення кількості антенних елементів АР та каналів обробки кількість потенційно компенсованих АЗ також збільшиться. Враховуючи масогабаритні характеристики антени «ДБ11», доцільно розглянути її можливий конструктивний варіант із трьох (див. рис. 1б) та чотирьох антенних елементів, які, відповідно, забезпечать триканальну ($M = 3$) та чотириканальну ($M = 4$) вагову обробку сигналу на фоні дії АЗ.

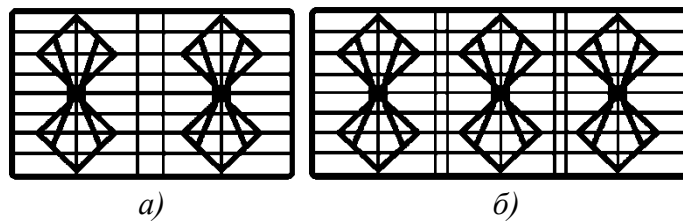


Рис. 1. Антена «ДБ11» РРС «Р-415»: а) $M = 2$; б) удосконалена, $M = 3$

Схемне рішення повинно забезпечувати компенсацією діючих АЗ шляхом подання суміші сигналу та АЗ із кожного антенного елемента на M відповідних каналів вагової обробки. Після обробки сигнал надходить у блок прийомопередавача РРС «Р-415В».

Просторова оброблення реалізується шляхом вагового складання комплексних амплітуд коливань $Y_m(t)$, прийнятих елементами антенної системи $m = 1, \dots, M$, із комплексними ваговими коефіцієнтами $R_m(\alpha)$, що вводяться поканально за допомогою підсилювачів, атенуаторів та фазообертавачів. В узагальненому векторно-матричному записі

$$Y_{\Sigma}(t) = Y^T(t) R^*(\alpha) \quad (1)$$

це враховується як множення вектора-рядка прийнятих коливань $Y^T(t)$ на комплексно-спряжений ваговий вектор-стовпець $R^*(\alpha)$. На рис. 2 зображено схему просторової обробки сигналів і завад без кола зворотного зв'язку [8].

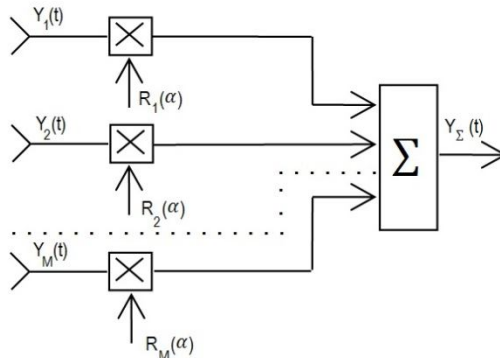


Рис. 2. Структурна схема просторової обробки в багатоканальних приймальних системах

Вважаємо, що фазовий фронт електромагнітних хвиль (ЕМХ), які надходять, можна вважати плоским, тобто ДРВП знаходиться в дальній зоні приймальної апертури, а АР складається з M ідентичних слабкоспрямованих приймальних елементів, тому виконується умова

$$\frac{L}{c} \ll \frac{1}{\Delta f_c},$$

де L – максимальний лінійний розмір приймальної апертури;

c – швидкість світла;

Δf_c – ширина спектра сигналу.

Цей вираз показує, що час затримки сигналів, прийнятих першим і останнім елементами АР, багато менше періоду найвищої гармоніки в спектрі модуляції прийнятого сигналу. Тобто така затримка практично не позначається на комплексній амплітуді прийнятого сигналу.

Власні шуми приймальних каналів стаціонарні, взаємозалежні, розподілені за нормальним законом із нульовим середнім і дисперсією $\sigma_{ш}^2$. Спектральні щільності потужності власних шумів у каналах прийому N_{om} рівномірні в смузі частот Δf (Δf_m – смуга пропускання m -го приймального каналу) [9].

Корисний сигнал подамо у вигляді вектора-стовпця комплексних амплітуд коливань в елементах антени:

$$X(t, \alpha_c) = X(t) X(\alpha_c), \quad (2)$$

де $X(t)$ описує закон зміни в часі комплексних амплітуд сигнальних коливань, загальний для всіх антенних елементів;

$X(\alpha_c)$ описує амплітудно-фазовий розподіл (АФР) сигналу на розкритті антенної системи, що залежить від виду апроксимації (сферична, плоска) і параметрів фронту хвилі, яка надходить. Для плоских хвиль $X(\alpha_c)$ залежить від напрямку надходження.

Вектор-стовпець $X(\alpha_c)$ для лінійної еквідистантної АР зі слабкоспрямованими елементами можна подати в такому вигляді:

$$X(\alpha_c) = \|\exp(-j \alpha_m)\|, \quad m=1, \dots, M, \quad (3)$$

де α_m – просторовий параметр, що характеризує напрямок надходження сигналу:

$$\alpha_m = \frac{(m-1) \cdot 2\pi d \sin Q}{\lambda}, \quad (4)$$

де d – відстань між сусідніми елементами антенної системи (АС);

Q – кутова координата джерела випромінювання відносно нормалі до АР;

λ – довжина хвилі прийнятого коливання.

Позначивши різницю фаз сигналів, прийнятих сусідніми елементами АР, $\Delta\Phi = \frac{2\pi d \sin Q}{\lambda}$, вираз (3) приведемо до такого вигляду: $\alpha_m = (m-1) \cdot \Delta\Phi$.

Заваду вважаємо стаціонарною. Вона створюється взаємно-некорельованими джерелами, а саме незалежними зовнішніми джерелами і внутрішніми шумами приймальних каналів. Вектор-стовпець комплексних амплітуд напруг завад на виходах антенних елементів подамо як

$$Y_p(t) = N_o(t) + \sum_{k=1}^n X(\alpha_{pk}) N_k(t), \quad (5)$$

де $X(\alpha_{pk}) = \|X_m(\alpha_{pk})\|$ – вектор-стовпець АФР, позначення якого узгоджується з позначенням сигнального вектора-стовпця, характер просторового розподілу не залежить від природи випромінюючого джерела;

$N_k(t)$ – комплексна амплітуда напруги завади від k -го джерела на виході довільного m -го антенного елемента за одиничного амплітудно-фазового множника $X_m(\alpha_{pk}) = 1$;

$N_o(t)$ – M -мірний вектор-стовпець, що описує закон зміни в часі власних шумів приймальних каналів.

Результуючий вектор сигналів на вході АР дорівнює

$$Y(t) = X(t, \alpha_c) Y_p(t). \quad (6)$$

Кореляційна матриця завад враховує кореляцію коливань завад за елементами АР [8]:

$$F(t, s) = M [Y(t) Y^{*T}(s)/2];$$

$$F = F_o + \sum_{k=1}^n N_k X(\alpha_{pk})(\alpha_{pk}) X^{*T}(\alpha_{pk}), \quad (7)$$

де $F_o = \text{diag}(N_{om})$ – діагональна матриця розміру M на M -спектральних щільностей потужностей власних шумів приймальних каналів;

N_k – спектральна щільність потужності сигналу k -ї завади прийнятого довільним m -м елементом АС при $X_k(\alpha_{pk}) = 1$.

Співвідношення (7) запишемо в такому вигляді:

$$F = F_o + \Lambda H \Lambda^{*T}, \quad (8)$$

де Λ – матриця M на k векторів-стовпців АФР завад, що створюються зовнішніми джерелами:

$$\Lambda = \| X(\alpha_{p_1}) X(\alpha_{p_2}) \dots X(\alpha_{p_k}) \|;$$

H – діагональна матриця k на k спектральних щільностей потужності діючих завад, $H = \text{diag}(N_k)$.

Ваговий вектор визначається як добуток оберненої кореляційної матриці на АФР корисного сигналу на розкритті антени:

$$R(\alpha_c) = F^{-1} X(\alpha_c). \quad (9)$$

У підсумку результатом просторової обробки є вагова сума:

$$Y_\Sigma(t) = Y^T(t) R^*(\alpha_c). \quad (10)$$

Реалізація алгоритму просторової обробки ґрунтується на використанні багатоканальних за входом систем. При цьому кількість каналів обробки обумовлена кількістю антенних елементів в АР та початковими умовами реалізації алгоритму. Розрахунки ефективності будемо виконувати для лінійної еквідистантної АР із кількістю антенних елементів M . У ході вагової просторової обробки кількість каналів обробки відповідає кількості заданих антенних елементів.

З метою визначення ефективності компенсації АЗ пристроями просторової обробки, виділимо сукупність параметрів і характеристик, що дозволяють оцінити якість роботи алгоритму завадозахисту [9].

Відношенням сигнал / завада + шум, за визначенням, називають відношення сигнал / завада на вході лінійного тракту обробки (за потужністю, за напругою). У ході просторової обробки параметр визначають за таким виразом:

$$q^2 = 2E_0 X^T(\alpha)(F^{-1})^* X^*(\alpha), \quad (11)$$

де $E_0 = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |X(t)|^2 dt$ – енергія сигналу на одиничному вихідному опорі довільного i -го елемента антени при $|X_i(\alpha)| = 1$. За відсутності зовнішньої завади ($F = F_0$) значення $q^2 = q_0^2$ (відношення сигнал / шум) [9].

Коефіцієнт подавлення завади схемою захисту K_{Π} показує в скільки разів зменшилася потужність завади на виході системи компенсації по відношенню до потужності завади на її вході. K_{Π} визначаємо за таким виразом [4]:

$$K_{\Pi} = P_{\Pi ВХ} / P_{\Pi ВИХ}. \quad (12)$$

Якщо ваговий вектор відомий, то можна не тільки реалізувати просторову обробку, але й розрахувати характеристику спрямованості. Остання визначається як залежність комплексної амплітуди вихідної напруги від напрямку надходження α_0 очікуваного сигналу (гармонічної плоскої хвилі) у разі заданих напрямків надходження корисного сигналу $-\alpha_c$ і сигналів активних завод $-\alpha_p$:

$$F_{\Sigma}(\alpha_o | \alpha_c, \alpha_p) = k_0 X^T(\alpha_o) R^*(\alpha_c, \alpha_p), \quad (13)$$

де k_0 – нормуючий коефіцієнт [9].

У разі дії зовнішніх джерел (коли завада корельована за розкритом) в оптимальній характеристиці спрямованості формуються провали в напрямку на них.

Для дослідження роботи схеми просторової обробки сигналів і завад залежно від кількості, а також енергетичних і просторових параметрів АЗ було використано систему комп'ютерної алгебри – Mathcad 15. Було обрано початкові умови та досліджено ефективність компенсації однієї АЗ, що діє в напрямку першої бокової пелюстки ($Qp = 32^\circ$) за триканальної просторової обробки, а також компенсацію двох АЗ, які діють у напрямку першої та другої бокових пелюсток ($Qp_1 = 32^\circ$, $Qp_2 = 60^\circ$) за чотириканальної просторової обробки.

Робота алгоритму компенсації досліджувалася для АЗ із відношенням їх спектральної щільності потужності до спектральної щільності внутрішніх шумів каналів обробки (Np) 20 дБ, 30 дБ, 50 дБ. У результаті роботи алгоритму в напрямку АЗ формується «провал» у характеристиці спрямованості. На рис. 3 проілюстровано компенсацію АЗ, що діє з кутового напрямку $Qp = 32^\circ$ ($Np = 30$ дБ), триканальною схемою обробки.

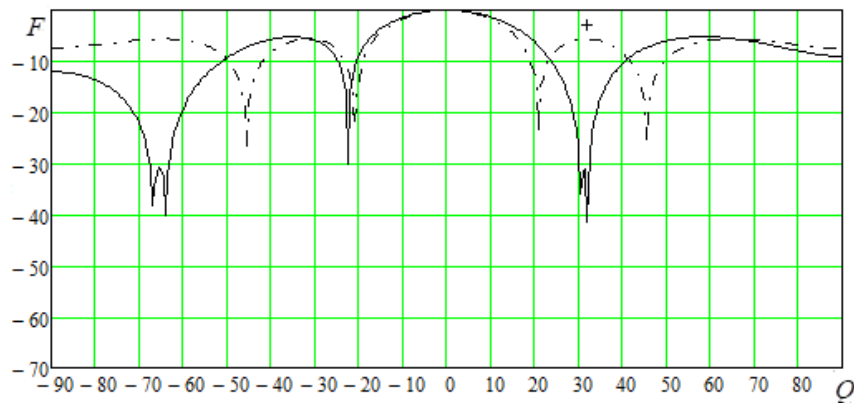


Рис. 3. Характеристика спрямованості в разі просторової компенсації АЗ, що діє в напрямку першої бокової пелюстки

Зменшення значення нормованої характеристики спрямованості в напрямку діючих АЗ забезпечує їх компенсацію, яку чисельно характеризує значення коефіцієнта подавлення завад (K_{Π}) та забезпечує вигреш у відношенні сигнал, завада + шум (Δq^2).

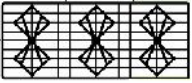
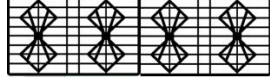
У табл. 1 наведено значення показників ефективності алгоритму просторової обробки, які досліджувалися за різних початкових умов для двох варіантів реалізації в РРС «Р-415В» з одним додатковим антенним елементом та трьома каналами обробки, а також із двома додатковими антенними елементами та чотирма каналами обробки.

Отримані абсолютні (теоретичні) значення показників пояснюються тим, що в ході обчислень не враховано впливу дестабілізуючих факторів: декореляції сигналів у каналах

обробки, кінцевої розрядності за цифрової обробки, кінцевості коефіцієнта накопичення під час оцінювання кореляційної матриці, додаткових апаратурних помилок, що вносяться аналого-цифровими перетворювачами [8].

Таблиця 1

Значення показників ефективності алгоритму просторової обробки

$M_{ел}$	3 			4 		
$N_p, дб$	20	30	50	20, 20	30, 30	50, 50
$Q_p, град$	32			30, 60		
Δq^2	$1,4 \times 10^3$	$1,5 \times 10^4$	$1,5 \times 10^6$	$2,7 \times 10^3$	$2,8 \times 10^4$	$2,8 \times 10^6$
$K_{п}$	371	$3,7 \times 10^3$	$3,7 \times 10^5$	715	$7,14 \times 10^3$	$7,14 \times 10^5$

Отже, отримані результати підтверджують ефективність просторової компенсації АЗ багатоканальними приймальними системами. Реалізація обробки в РРС «Р-415В» покращить її завадозахищеність у складній РЕО та в разі дії навмисних АЗ.

Висновки. У статті розглянуто підхід до покращення завадозахищеності СЗіПД комплексів РМ за рахунок використання вагової просторової обробки, який є найбільш раціональним, оскільки компенсація діючих завад здійснюється за умови наявності просторових відмінностей між напрямками надходження корисного сигналу і завади, що є характерним для РРС.

Досліджено показники ефективності алгоритму просторової компенсації завад у ході його застосування в СЗіПД комплексів РМ військового призначення. Отримані результати не суперечать відомим науковим положенням.

Використання просторової обробки в СЗіПД на основі РРС «Р-415В» у складі комплексу засобів синхронного пеленгування та комплексів радіотехнічного моніторингу дозволить покращити завадозахищеність та забезпечить достовірність інформаційного обміну в складній РЕО в разі дії пасивних та АЗ.

У подальшому заслуговує на увагу дослідження питань щодо спільного застосування декількох способів завадозахищеності, наприклад, просторової-поляризаційної селекції, завадостійкого кодування інформації, реалізації СЗіПД на основі технології МІМО.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Гребенюк О. П., Меленський В. Д., Коріненко В. І. Застосування завадостійкого кодування в системах зв'язку і передачі даних комплексів радіомоніторингу для забезпечення достовірності інформаційного обміну // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ ДУТ, 2015. Вип. 11. С. 44–50.
2. Слободянюк П. В., Благодарний В. Г., Ступак В. С. Довідник з радіомоніторингу / Під заг. ред. П. В. Слободянюка. Ніжин : ТОВ Вид. "Аспект-Поліграф", 2008. 588 с.

3. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. А. М. Рембовского. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Горячая линия – Телеком, 2010. 624 с.
4. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю. И. Лосев, А. Г. Бердников, Э. Ш. Гойхман, Б. Д. Сизов; под ред. Ю. И. Лосева. Москва : Радио и связь, 1988. 208 с.
5. Адаптивные антенные решетки : учеб. пособ. / В. А. Григорьев, С. С. Щесняк, Ю. А. Гулюшин, Ю. А. Распаев, О. И. Лагутенко, А. С. Щесняк. Санкт-Петербург : Ун-т ИТМО, 2016. 179 с.
6. Гурський Т. Г. Сучасні радіотехнології у військовій техніці радіозв'язку // Системи управління. Телеком. Військовий зв'язок. 2019. № 8. С. 44–48.
7. Техническое описание: Радиорелейная станция «Р-415». Москва : Воениздат, 1979. 215 с.
8. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. Москва : Радио и связь, 2003. 200 с.
9. Григорьев В. А. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи. Москва : Эко-Трендз, 2002. 264 с.
10. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. Москва : Наука, 2004. 560 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021.

REFERENCES

1. Hrebenuk, O. P., Melenskyi, V. D., & Korinenko, V. I. (2015). Zastosuvannia zavadostiikoho koduvannia v systemakh zv'iazku i peredachi danykh kompleksiv radiomonitorynhu dlia zabezpechennia dostovirnosti informatsiinoho obminu [Using of noise-tolerant coding in communication and data transmission systems of radio monitoring complexes to ensure the reliability of information exchange]. *Problemy stvorennia, vyprovovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system : zb. nauk. prats [Problems of construction, testing, application and operation of complex information systems. Scientific journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 11, 44–50. Zhytomyr : ZhMI DUT [in Ukrainian].
2. Slobodianiuk, P. V., Blahodarnyi, V. H., & Stupak, V. S. (2008). *Dovidnyk z radiomonitorynhu [Handbook of radio monitoring]*. P. V. Slobodianiuk (Ed.). Nizhyn [in Ukrainian].
3. Rembovskii, A. M., Ashikhmin, A. V., & Koz'min, V. A. (2010). *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva [Radio monitoring: tasks, methods, tools]*. A. M. Rembovskii (Ed.). (2nd ed.). Moscow [in Russian].
4. Losev, Iu. I., Berdnikov, A. G., Goikhman, E. Sh., & Sizov, B. D. (1988). *Adaptivnaia kompensatsiia pomekh v kanalakh sviazi [Adaptive compensation of interference in communication channels]*. Iu. I. Losev (Ed.). Moscow [in Russian].
5. Grigor'ev, V. A., Shchesniak, S. S., Guliushin, Iu. A., Raspaev, Iu. A., Lagutenko, O. I., & Shchesniak, A. S. (2016). *Adaptivnye antennye reshetki [Adaptive antenna arrays]*. Saint Petersburg [in Russian].
6. Hurskyi, T. H. (2019). Suchasni radiotekhnolohii u viiskovii tekhnitsi radiozv'iazku [Modern radio technology at the most advanced radio communication technology]. *Systemy upravlinnia. Telekom. Viiskovyi zv'iazok [Management systems. Telecom. Military communications]*, 8,

44–48 [in Ukrainian].

7. *Tekhnicheskoe opisanie: Radioreleinaia stantsiia «R-415» [Technical description: Radar relay station "R-415"]*. (1979). Moscow [in Russian].

8. Ratynskii, M. V. (2003). *Adaptatsiia i sverkhrazreshenie v antenykh reshetkakh [Adaptation and superresolution in antenna arrays]*. Moscow [in Russian].

9. Grigor'ev, V. A. (2002). *Kombinirovannaia obrabotka signalov v sistemakh radiosviazi [Combined signal processing in radio communication systems]*. Moscow [in Russian].

10. Gantmakher, F. R. (2004). *Teoriia matrits [Matrix theory]*. Moscow [in Russian].

O. P. Hrebenyuk, M. A. Rohovets, O. O. Hrebenyuk

SPATIAL PROCESSING USING IN COMMUNICATION SYSTEMS FOR RADIO MONITORING COMPLEXES TO ENSURE THE NOISE IMMUNITY

The article investigates the issue of improving the level of environmental in communication systems and data transmission of radio monitoring complexes.

The relevance of this task is due to the complexity of the modern electronic environment, which is characterized by high dynamics and saturation with electronic means that work on radiation and have a mutual impact, as well as the importance of tasks performed by military radio monitoring units.

The paper proposes the use of the algorithm of multichannel weight spatial processing of signals against the background of interference to improve the obstruction of communication systems and data transmission on the basis of the radio relay station "R-415V". This approach is the most rational, since the compensation of existing obstacles is carried out subject to the presence of spatial differences between the directions of the arrival of a useful signal and the obstacle that it is typical for radio relay stations.

In addition, the technical prerequisite for the implementation of the proposed solution is the presence in the radio relay station "P 415V" of the directional antenna "DB11", consisting of two identical z-emitters and is the simplest two-element antenna grille that can be used to implement multichannel weight treatment. The article presents the spatial processing algorithm, selected performance indicators and investigated the effectiveness of its work. The calculations were carried out using the computer algebra system – Mathcad 15.

Were obtained visual, quantitative and qualitative results of performance indicators depending on the selected electronic situation for certain tactical and technical characteristics of the means of transmitting information without taking into account the influence of destabilizing factors on the quality of processing.

Keywords: *radio monitoring; preventability; weight spatial processing; compensation of obstacles; communication and data transmission system.*

С. С. Гаценко, К. М. Сапожников, І. В. Пазич, О. В. Гаєвський, С. В. Костінський

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ РАДІОПРИЙМАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ІЗ РОЗШИРЕНИМ ЧАСТОТНИМ ДІАПАЗОНОМ ПРИЙМАННЯ

В умовах кризової ситуації на території України в східних регіонах ключове значення має моніторинг ситуації та її змін. У зв'язку з цим системи й засоби спостереження потребують модернізації для ефективного виконання завдань. У даний час у галузі розробки та проектування сучасних радіоприймальних пристроїв спостерігається стрімке зростання вимог до їх швидкодії, вартості, потужності живлення та спектральної ефективності.

У практиці ведення радіомоніторингу виникає суперечність між необхідністю забезпечення жорстких вимог до потужності споживання радіоприймального пристрою та розширенням діапазону приймання частот. Застосування аналого-цифрових перетворювачів, що перебудовуються з максимальною частотою дискретизації, недостатнє для розміщення всього діапазону центральних частот основного каналу прийому в нульовій смузі Найквіста. Зміна частоти дискретизації відповідно до частоти основного каналу приймання функціонально обмежує багатоканальність приймального тракту.

Найбільше вимогам до систем і засобів радіомоніторингу відповідають радіоприймальні тракти, побудовані на базі технології SDR [3], в основі якої лежить відцифровування радіосигналу в масштабі часу, наближеному до реального, і подальша цифрова обробка сигналів програмними або апаратними цифровими засобами: цифровими сигнальними процесорами або спеціалізованими системами на кристалі. Дана технологія дозволяє замінити величезне розмаїття наявних і розроблюваних конструкцій радіоприймачів і трансиверів, як серійних, так і передусім аматорських, побудованих за складною супергетеродинною схемою, на обмежену кількість доступних апаратних блоків, що працюють під управлінням. Це зумовить спрощення та здешевлення конструкцій, істотне поліпшення характеристик, підтримку будь-яких видів модуляції, появу великої кількості сервісних функцій, а також прискорить розробку. SDR технологію можна застосовувати в системах радіочастотного розпізнавання (RFID), які працюють на різних частотах і використовують різні протоколи.

У статті розглянуто спосіб приймання та оброблення радіосигналів для забезпечення найкращої вартості й ефективної потужності енергоспоживання багатоканального радіозв'язку в розширеному частотному діапазоні. Наведено структурну схему, що реалізує запропонований спосіб.

Ключові слова: програмований радіоприймальний пристрій; частота дискретизації; смуга Найквіста; цифрова обробка сигналів; радіозв'язок; аналого-цифровий тракт; смуга приймання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На даний час у галузі розробки та проектування сучасних радіоприймальних пристроїв спостерігається стрімке зростання

вимог до їх швидкодії, вартості, потужності живлення та ефективності [3, 4]. Найбільше їм відповідають радіоприймальні тракти, побудовані на базі технології SDR, в основі якої лежить відцифровування радіосигналу в реальному часі та подальша цифрова обробка сигналів (ЦОС) програмними або апаратними цифровими засобами: цифровими сигнальними процесорами або спеціалізованими системами на кристалі [5, 6].

Для усунення суперечності між необхідністю забезпечення жорстких вимог до потужності споживання радіоприймального пристрою та розширенням діапазону приймання частот застосовують аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що перебудовуються, з максимальною частотою дискретизації, недостатньою для розміщення всього діапазону центральних частот основного каналу приймання (ОКП) в нульовій смузі Найквіста. Але зміна частоти дискретизації відповідно до частот ОКП функціонально обмежує багатоканальність приймального тракту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розробки радіоприймальних пристроїв у більшості випадків застосовують оптимізаційні процедури побудови, що не потребують великих ресурсних затрат і забезпечують підвищення ефективності їх роботи. На даний час вирішенню даного науково-практичного завдання присвячено значну кількість наукових робіт [6–9].

Так, у роботі [4] визначено, що в разі переходу від аналогового до цифрового перетворення сигналів енергетичні втрати зростають, як і за цифрової узгодженої фільтрації, коли цифрова кореляційна обробка в реальному масштабі часу можлива лише для порівняно вузькосмугових сигналів.

У [8] зазначено, що під час вибору аналогового чи цифрового методу обробки сигналів у приймачі необхідно врахувати, що ЦОС слід застосовувати в разі складних алгоритмів роботи приймача, необхідності адаптації, запам'ятовування сигналу, прагнення отримати високі точності оцінки параметрів сигналу.

Формулювання завдання дослідження. У статті розглянуто спосіб приймання та оброблення радіосигналів для забезпечення ефективної вартості й потужності енергоспоживання багатоканального радіозв'язку в розширеному частотному діапазоні. Обґрунтовано ефективність застосування такого підходу. Наведено структурну схему, що реалізує запропонований спосіб.

Виклад основного матеріалу. У відомих варіантах побудови аналого-цифрового тракту (АЦТ) для приймання на частотах з безперервного діапазону, що перебиває кілька смуг Найквіста, здійснюється зміна частоти дискретизації одним із відомих способів [4, 10–11].

Розглянемо наведену на рис. 1 структурну схему радіоприймального пристрою, у якому застосовується метод зміни частотного режиму роботи АЦТ відповідно до частоти ОКП.

У такому АЦТ для формування частоти дискретизації застосовується її джерело, що переналаштовується, з діапазоном формованих частот, обмеженим інтервалом $[f_{d_{min}} \dots f_{d_{max}}]$, де частота дискретизації недостатня для розміщення всього діапазону центральних частот ОКП $f_{d_{min}} \dots f_{d_{max}}$ у нульовій смузі Найквіста.

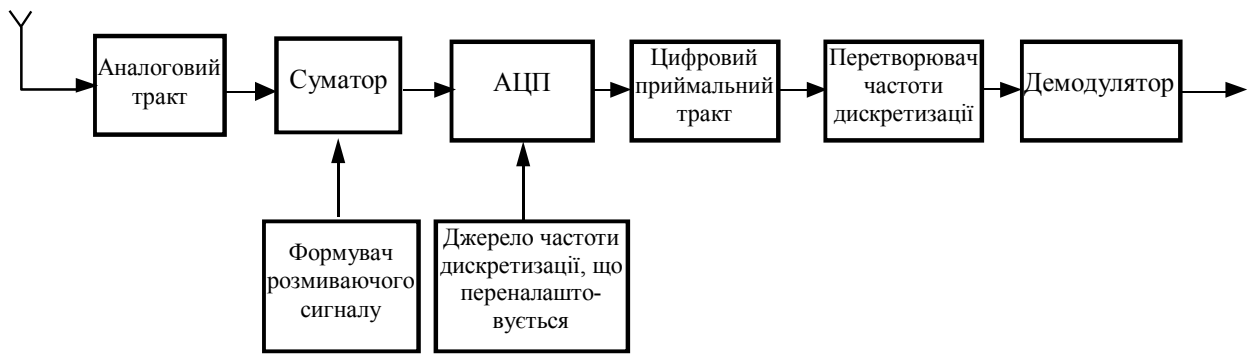


Рис. 1. Структурна схема АЦТ радіоприймального пристрою з джерелом частоти дискретизації, що переналаштовується в одній смузі Найквіста

Недоліками пристроїв такого типу є:

1) наявність функціональних обмежень на реалізацію багатоканального приймання в безперервному діапазоні робочих частот через необхідність перебудови частоти дискретизації для приймання на різних частотах;

2) необхідність використання джерела частоти дискретизації, яка перебудовується, знижує швидкість налаштування радіоприймального пристрою на частоту приймання, що знижує завадозахищеність радіолінії передачі інформації.

Тому реалізація ефективного за вартістю і потужністю споживання багатоканального радіоприймального пристрою з розширеним частотним діапазоном приймання без джерел частоти дискретизації, що переналаштовуються, є складним і актуальним завданням.

Для вирішення поставленого завдання пропонуємо розділити АЦТ на дві паралельні гілки з окремими АЦП у кожній і джерелами частоти дискретизації, що не переналаштовуються, чим забезпечується, по-перше, швидкість перебудови частот приймання, по-друге, можливість приймання в декількох каналах, розташованих у безперервному діапазоні частот, що перекриває кілька смуг Найквіста із заданим рівнем вибірконості за побічними каналами приймання (ПКП). Функціональну схему запропонованого приймача наведено на рис. 2.

Запропонований підхід працює в такий спосіб: радіочастотний сигнал надходить на вхід радіоприймального пристрою й одночасно проходить через окремі аналогові тракти, у яких відбувається його посилення та ослаблення сигналів на частотах відповідних ПКП. Далі з виходу аналогових трактів сигнал надходить на перші входи відповідних суматорів, на другі входи яких поступає сигнал з еквівалентних один одному виходів формувача розмиваючого сигналу. Після цього з виходів суматорів сигнал прямує на сигнальні входи першого та другого АЦП відповідно, на тактові входи яких надходять сигнали частоти дискретизації.

Для формування частоти дискретизації застосовуються окремі її джерела, що не переналаштовуються з частотами $f_{d_1} \geq f_{d_{max}}$ та $f_{d_2} \geq \frac{2f_{d_{max}}}{3}$, недостатніми для розміщення всього діапазону частот приймання $f_{ex_{min}} \geq f_{ex_{max}}$ у нульовій частоті Найквіста.

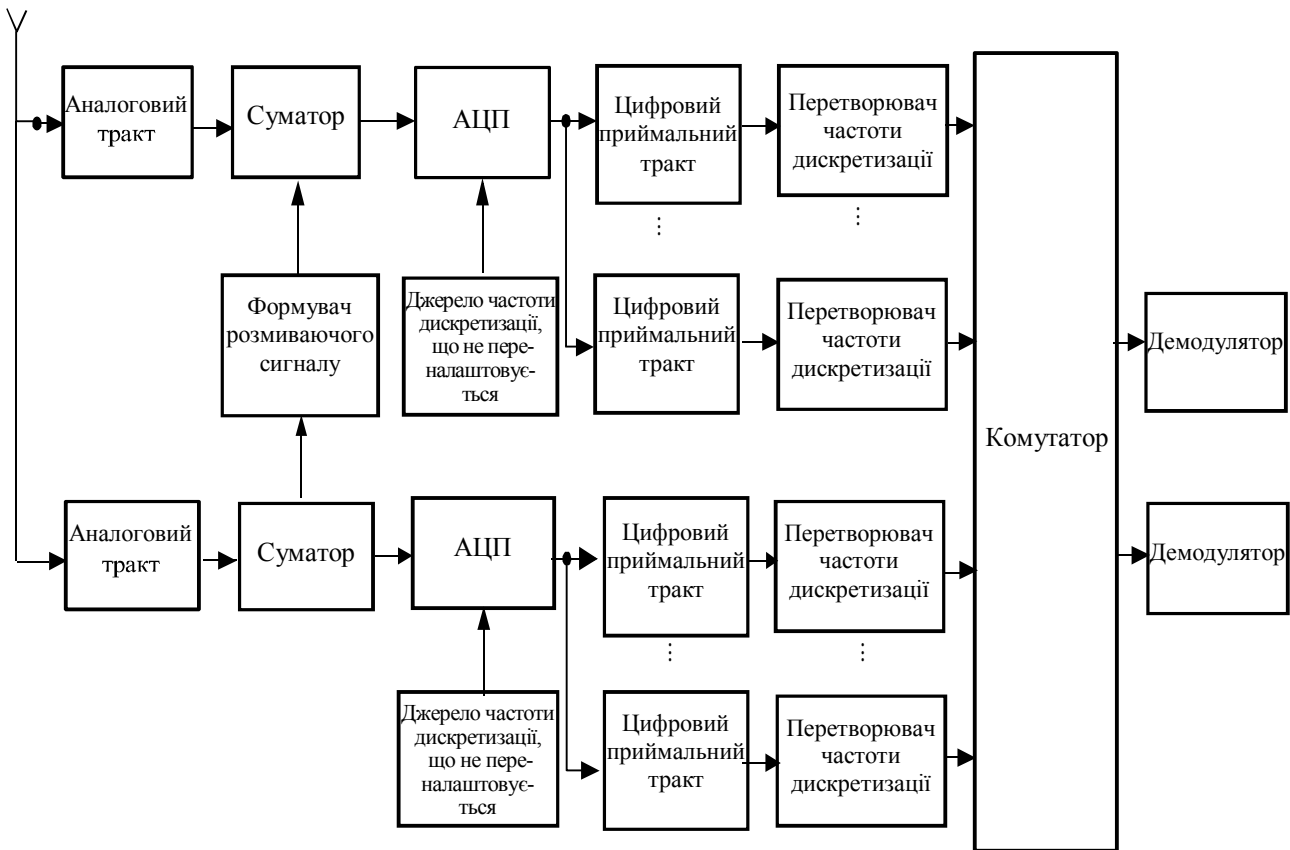


Рис. 2. Структурна схема АЦТ багатоканального радіоприймального пристрою з джерелами частот дискретизації, що не переналаштовуються, і безперервним діапазоном робочих частот, який перекидає більше однієї смуги Найквіста

Квантовані відліки сигналу після першого АЦП одночасно надходять у N цифрових приймальних трактів першого каналу з частотами налаштування, вибраними в частотному діапазоні $f_{ex_min} \geq \frac{5}{12} f_{d_max}$ або $\frac{7}{12} f_{d_max} \geq f_{ex_min}$, а після другого АЦП – до K цифрових приймальних трактів другого каналу з частотами налаштування, вибраними в частотному діапазоні $\frac{5}{12} f_{d_max} \geq \frac{7}{12} f_{d_max}$, де здійснюється фільтрація, перенесення сигналу на нульову частоту і децимація зниження частоти дискретизації до відповідного значення. Потім сигнал проходить через відповідні перетворювачі частоти дискретизації, у яких здійснюється приведення частоти дискретизації цифрового сигналу до відповідного фіксованого значення та забезпечується заданий динамічний діапазон. Далі перетворені сигнали комутуються на відповідні M демодуляторів, у яких ухвалюється рішення про приймання сигналу.

Безперечними перевагами такої реалізації пристрою є можливість багатоканального приймання в безперервному діапазоні робочих частот, що перекидає більше однієї смуги Найквіста, і збільшення швидкості налаштування радіоприймального пристрою на частоти приймання, оскільки в ньому застосовуються джерела частот дискретизації, що не переналаштовуються.

Висновки. Отримані результати дозволяють реалізувати радіоприймальні пристрої, що здійснюють приймання сигналів у кількох каналах, розташованих у безперервному діапазоні частот, що перекриває більше однієї смуги Найквіста, без необхідності перебудови частот дискретизації залежно від частоти приймання, що, без сумніву, позитивно впливає на швидкодію, вартість та потужність споживання.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / Под ред. д-ра техн. наук А. М. Рембовского. 3-е изд. Москва, 2012. 640 с.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория : справочник / Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко и др. ; под ред. Я. Д. Ширмана. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : Радиотехника, 2007. 510 с. : ил.
3. RTL – SDR приймач. URL: <https://habr.com/ru/post/373465/> (дата звернення 27.04.2020).
4. Технологія SDR. URL: <https://multicore.ru/index.php?id=20> (дата звернення 21.10.2021).
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. Москва : Изд. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
6. Баева Н. Н. Многоканальная электросвязь и РРЛ. Москва : Радио и связь, 1998. 312 с.
7. Основы побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору : конспект лекцій / К. С. Васюта, О. В. Тесленко, В. М. Купрій, О. А. Малишев. Харків : ХУПС, 2013. 212 с.
8. Горшелев В. Д., Красноцветова З. Г., Федорцев Б. Ф. Основы проектирования. Ленинград : Энергия, 1977. 384 с.
9. Справочник по проектированию приёмноусилительных устройств / М. К. Белкин и др. Київ : Вища школа, 1988. 472 с.
10. Радиоприемные устройства / Н. Н. Фомин, Н. Н. Буга, О. В. Головин ; под ред. Н. Н. Фомина. Москва : Радио и связь, 2003. 520 с.
11. Марков Ю. В., Боков А. С. Проектирование устройств приема и обработки сигналов : учеб-метод. пособ. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. 112 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021.

REFERENCES

1. Rembovskii, A. M., Ashikhmin, A. V., & Koz'min, V. A. (2012). *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva* [Radio monitoring: tasks, methods, means]. A. M. Rembovskii (Ed.). (3d ed.). Moscow [in Russian].
2. Shirman, Ia. D., Bagdasarian, S. T., & Maliarenko, A. S. et al. (2007). *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniia i teoriia : spravochnik* [Radioelectronic systems. Fundamentals of construction and theory: a reference book]. Ia. D. Shirman (Ed.). (2nd ed.). Moscow [in Russian].
3. *RTL – SDR pryimach* [RTL – SDR receiver]. (n.d.). Retrieved from <https://habr.com/ru/post/373465/> [in Ukrainian].

4. *Tekhnolohiia SDR [SDR technology]*. (n.d.). Retrieved from <https://multicore.ru/index.php?id=20> [in Ukrainian].
5. Skliar, B. (2003). *Tsifrovaia sviaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]*. (2nd ed.). Moscow [in Russian].
6. Baeva, N. N. (1998). *Mnogokanal'naia elektrosviaz' i RRL [Multichannel telecommunications and RRL]*. Moscow [in Russian].
7. Vasiuta, K. S., Teslenko, O. V., Kuprii, V. M., & Malyshev, O. A. (2013). *Osnovy pobudovy radiolokatsiinykh zasobiv rozvidky povitrianoho prostoru : konspekt lektsii [Fundamentals of construction of radar means of airspace reconnaissance: lecture notes]*. Kharkiv: KNAFU [in Ukrainian].
8. Gorshelev, V. D., Krasnotsvetova, Z. G., & Fedortsev, B. F. (1977). *Osnovy proektirovaniia [Basics of design]*. Leningrad [in Russian].
9. Belkin, M. K. et al. (1988). *Spravochnik po proektirovaniuu priemnousilitel'nykh ustroystv [Receiver Design Handbook]*. Kyiv [in Russian].
10. Fomin, N. N., Buga, N. N., & Golovin, O. V. (2003). *Radiopriemnye ustroystva [Radio receivers]*. N. N. Fomin (Ed.). Moscow [in Russian].
11. Markov, Iu. V., & Bokov, A. S. (2015). *Proektirovanie ustroystv priema i obrabotki signalov [Designing devices for receiving and processing signals]*. Ekaterinburg [in Russian].

S. S. Hatsenko, K. M. Sapozhnykov, I. V. Pazykh, O. V. Haievskyi, S. V. Kostinskyi
MULTICHANNEL RADIO RECEIVING DEVICE WITH EXTENDED RECEIVING FREQUENCY RANGE

In the context of the crisis situation on the territory of Ukraine in the eastern regions of the country, monitoring the situation and its changes is of key importance. As a result, monitoring systems and tools are subject to new requirements for speed and efficiency. Currently, in the field of development and design of modern radio receivers there is a rapid increase in requirements for their speed, cost, power supply and spectral efficiency [1]. In the practice of radio monitoring, there is a contradiction between the need to ensure strict requirements for the power consumption of the radio receiver and the expansion of the frequency reception range. The use of tunable digital-to-digital converters (ADCs) with a maximum sampling rate insufficient to accommodate the entire center frequency range of the main reception channel in the zero band of Nyquist [2]. Changing the sampling rate according to the frequency of the main reception channel functionally limits the multichannel reception path due to the need to use different sampling frequencies for reception at different frequencies. Most of the requirements for radio monitoring systems and means are met by radio receiving paths based on SDR technology [3], which is based on digitization of the radio signal in the time scale close to real and further digital signal processing (DOS) software or hardware digital - digital digital signal processors or specialized systems on the chip. This technology allows you to replace the huge variety of existing and developed designs of radios and transceivers, both serial and, above all, amateur, built on a complex superheterodyne scheme, a limited number of available hardware

units operating under control. This will simplify and reduce the cost of design, significantly improve performance, support all kinds of modulation, the emergence of a large number of service functions, as well as speed up development. SDR technology can be used in radio frequency recognition (RFID) systems that operate at different frequencies and use different protocols. The article considers the method of reception and processing of radio signals to ensure the effective cost and power consumption of multi-channel radio communication in the extended frequency range. The effectiveness of such an approach is substantiated. The block diagram that implements the proposed method is presented.

Keywords: *programmable radio receiving device; sampling frequency; Nyquist band; digital signal processing; radio communication; analog-digital path; reception lane.*

С. П. Фриз, Р. О. Авсієвич

АНАЛІЗ КОСМІЧНИХ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

В умовах агресії Російської Федерації проти України виникає гостра необхідність у збільшенні кількості джерел достовірної інформації про рухомі надводні об'єкти, що переміщуються в акваторії Чорного та Азовського морів.

Як джерела відповідної інформації доцільно розглядати космічні системи моніторингу рухомих надводних об'єктів, оскільки саме вони дозволяють оперативно виявляти, ідентифікувати та проводити спостереження за рухомими надводними об'єктами в різних погодних умовах на значних територіях без загрози життю та здоров'ю оператора системи й технічним засобам спостереження.

Застосування космічних систем для моніторингу надводних рухомих об'єктів в інтересах сектора безпеки та оборони України сприятиме досягненню показників, зазначених у Стратегії національної безпеки України, Стратегії воєнної безпеки України, Стратегічному оборонному бюлетені, Стратегії Військово-Морських Сил Збройних Сил України 2035, Візії розвитку Військово-Морських Сил 2035, Візії розвитку Збройних Сил України 2030. Зокрема, очікується нарощення спроможностей Військово-Морських Сил, передбачених єдиним переліком (каталогом) спроможностей Міністерства оборони України, Збройних Сил України тощо. Крім того, успішне вирішення поставленого завдання щодо прийому даних про рухомі надводні об'єкти від космічних систем сприятиме розвитку України як космічної держави.

Подальші дослідження за обраною тематикою будуть спрямовані на вивчення можливості створення універсальної автоматизованої системи приймання даних від космічних систем моніторингу надводних рухомих об'єктів, а також даних про геопросторове положення рухомих об'єктів у повітряному, морському та наземному просторах.

Ключові слова: надводна обстановка; виключна (морська) економічна зона; космічна система; оптико-електронне спостереження; радіолокаційне спостереження; космічний радіомоніторинг; C4ISR.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Про необхідність вирішення завдання моніторингу рухомих надводних об'єктів зазначається у Стратегії воєнної безпеки [1], Стратегічному оборонному бюлетені [2], рішенні Ради національної безпеки та оборони України від 12.10.2018 № 0011525 «Про невідкладні заходи щодо захисту національних інтересів на Півдні та Сході України, у Чорному та Азовському морях і Керченській протоці» [3], указі Президента України від 11.05.2021 № 189/2021 «Про Річну національну програму під егідою Комісії Україна – НАТО на 2021 рік» [4].

Крім того, відповідні рішення викладені в постановах та розпорядженнях Кабінету Міністрів України:

© С. П. Фриз, Р. О. Авсієвич, 2021

від 17.07.2003 № 410-р «Про схвалення Концепції створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження)» [5];

від 17.08.2008 № 834 «Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження)» [6];

від 13.10.2015 № 1068-р «Про затвердження плану першочергових заходів з облаштування державного кордону вздовж берегової лінії та забезпечення охорони територіального моря України в межах Донецької, Запорізької, Херсонської та Миколаївської областей» [7];

від 11.11.2015 № 926 «Про підвищення обороноздатності і безпеки держави в частині створення сучасної системи висвітлення надводної обстановки» [8];

від 23.11.2015 № 1189-р «Про схвалення Стратегії розвитку Державної прикордонної служби» [9];

від 14.06.2017 № 398-р «Про схвалення Основних напрямів розвитку озброєння та військової техніки на довгостроковий період» [10];

від 11.10.2017 № 747-р «Про схвалення Стратегії імплементації положень директив та регламентів Європейського Союзу у сфері міжнародного морського та внутрішнього водного транспорту («дорожньої карти»)» [11];

від 18.12.2018 № 1108 «Про внесення змін до Морської доктрини України на період до 2035 року» [12];

від 24.07.2019 № 687-р «Про схвалення Стратегії інтегрованого управління кордонами на період до 2025 року» [13].

Отже, питання моніторингу рухомих надводних об'єктів є вкрай актуальним завданням.

Відповідно до наведених керівних документів до 2025 року має бути створена державна інтегрована система висвітлення надводної та підводної обстановки в акваторіях Чорного й Азовського морів та басейнів річок Дніпро і Дунай. Зазначена система повинна забезпечити отримання в реальному масштабі часу даних про надводну та підводну обстановку в інтересах Військово-Морських Сил України, Державної прикордонної служби України, Міністерства інфраструктури України та інших органів державної влади.

Процес висвітлення надводної та підводної обстановки повинен включати процеси: виявлення, ідентифікації, супроводження рухомих надводних об'єктів, обробку отриманої інформації та її надання для зацікавлених державних органів влади України та міжнародних партнерів. Під рухомими надводними об'єктами слід розуміти пілотовані або безпілотні морські й річкові одиночні та групові об'єкти, що здатні переміщуватися на водній поверхні.

Головним розпорядником цієї інтегрованої системи має бути Командування Військово-Морських Сил України. Обмін відповідними даними в межах Збройних Сил України повинен здійснюватися через систему оперативного (бойового) управління, зв'язку, розвідки та спостереження (C4ISR) Збройних Сил України. Передачу даних до інших відомств планується організувати через мережу ситуаційних центрів.

Відповідно до Стратегії Військово-Морських Сил Збройних Сил України – 2035 систему планується створити в три етапи:

- 1-й етап (до 2025 року) – у межах територіального моря України (12 морських миль);
- 2-й етап (до 2030 року) – у межах виключної (морської) економічної зони України (200 морських миль);
- 3-й етап (до 2035 року) – Світовий океан.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективна реалізація другого та третього етапу неможлива без використання космічних систем моніторингу. Відповідно до рекомендацій Міжнародної морської організації берегові радіолокаційні засоби здатні ефективно проводити моніторинг територіального моря та прилеглої зони на відстані до 20 морських миль [14]. Виняток становлять загоризонтні радіолокаційні станції та комплекси радіотехнічної розвідки [15]. Однак зазначені засоби піддаються впливу радіоперешкод [16, 17]. Дальність і точність виявлення надводних цілей зазначеними засобами залежить від погодних умов, ефективної площі розсіювання об'єктів спостереження, використання радіовипромінювальних засобів цими об'єктами тощо. Патрульні засоби також мають обмежений радіус дії та не можуть використовуватися в разі погіршення погодних умов [18]. В усіх перерахованих випадках зберігається загроза життю та здоров'ю операторів і технічним засобам. У зв'язку із цим застосування космічних систем для моніторингу рухомих надводних об'єктів є доцільним.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є підготовка пропозицій щодо застосування космічних систем для виявлення рухомих надводних об'єктів в інтересах сектора безпеки й оборони України. Для цього необхідно провести аналіз космічних систем, що можна використовувати для виявлення рухомих надводних об'єктів, а також вивчення сучасного стану системи збору космічних даних про надводну обстановку. Отримані в рамках дослідження результати можуть бути корисними для створення державної інтегрованої системи висвітлення надводної та підводної обстановки в акваторіях Чорного й Азовського морів, басейнів річок Дніпро та Дунай, системи С4ISR Збройних Сил України, а також під час планування застосування вітчизняних наземних інформаційних комплексів для приймання даних від космічних систем виявлення надводних рухомих об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Враховуючи той факт, що Україна станом на 2021 рік не володіла власними космічними системами, для вирішення завдань моніторингу надводних рухомих об'єктів можуть бути залучені космічні системи країн-партнерів та комерційних операторів шляхом укладання міжнародних угод і комерційних договорів.

До космічних систем, що можуть бути використані для виявлення надводних рухомих об'єктів, слід віднести системи, наведені на рис. 1. Вони дозволяють у короткий проміжок часу організувати моніторинг значних територій. За такого підходу виключаються військові ризики для особового складу та техніки. Також такі космічні системи є менш чутливими до радіоелектронних перешкод порівняно з наземними засобами. Водночас використання космічних радіолокаційних систем та систем радіомоніторингу знімає обмеження щодо погодних умов та часу доби. Проаналізуємо їх для вивчення можливості використання під час вирішення завдань моніторингу надводних рухомих об'єктів в інтересах сектора безпеки й оборони України.

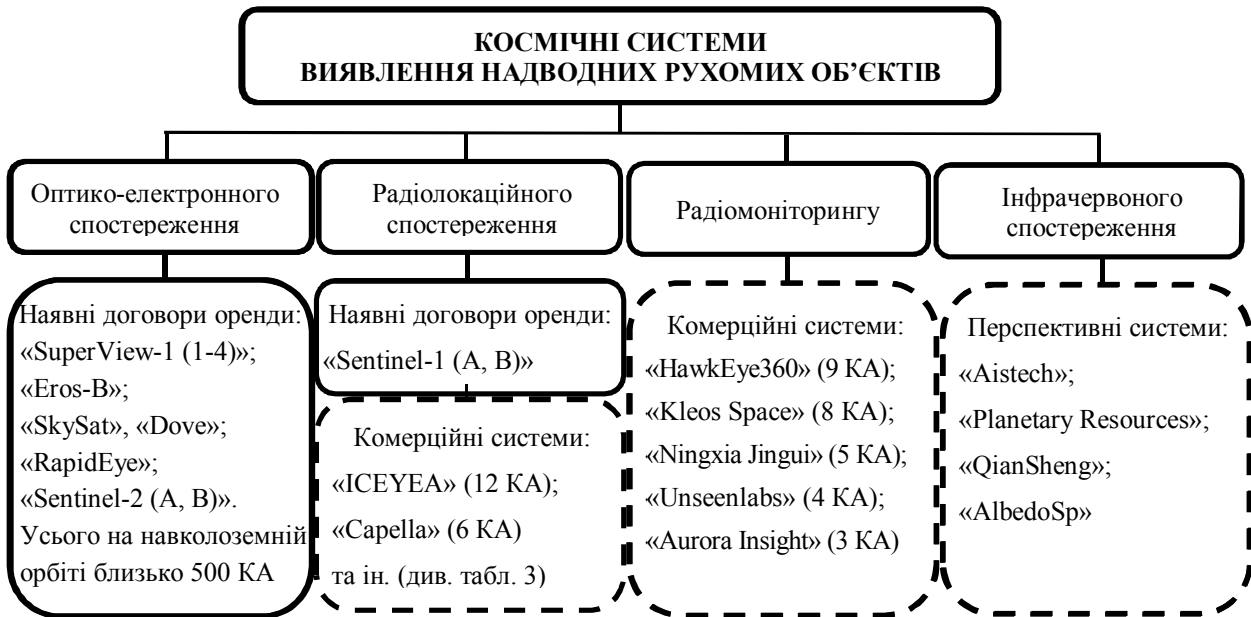


Рис. 1. Класифікація космічних систем виявлення рухомих надводних об'єктів

Космічні системи оптико-електронного спостереження є другим за чисельністю класом після телекомунікаційних. Кількість космічних апаратів (КА) оптико-електронного спостереження станом на грудень 2021 року становила близько 500 шт. (11% від загальної кількості КА на навколосемній орбіті) [19, 20]. Доцільність використання конкретної системи оптико-електронного спостереження передбачає розрахунок відповідності її просторової роздільної здатності завданням, які вона виконуватиме.

Відповідно до критерію Джонсона [21], забезпечення заданої ймовірності виявлення об'єкта залежить від значення просторової роздільної здатності оптико-електронної системи та розмірів об'єкта. При цьому зазначено, що об'єкт можна виявити з ймовірністю 95%, якщо він описується чотирма пікселями, та 100%, якщо описується шістьма пікселями (див. рис. 2).

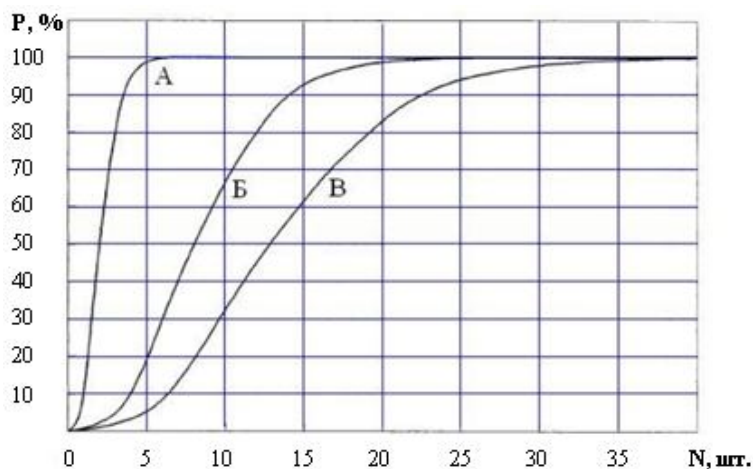


Рис. 2. Залежність ймовірності виявлення (А), розпізнавання (Б) та ідентифікації (В) об'єкта залежно від кількості пікселів, що описують об'єкт

Виходячи із вказаного критерію, проведено розрахунок потрібної просторової роздільної здатності видових зображень космічних систем оптико-електронного спостереження для забезпечення імовірності виявлення більшості надводних рухомих об'єктів на рівні 95% і вище (див. табл. 1).

Таблиця 1

Потрібна просторова роздільна здатність для забезпечення заданої ймовірності виявлення та розпізнавання надводних об'єктів

№ з/п	Назва об'єкта	Тоннажність, т	Розміри об'єкта, м	Виявлення (P = 95%), м	Розпізнавання до класу, м	Розпізнавання до типу, м
1	Патрульний катер, буксир	300	4–6 x 32–50	8	3	1
2	Корвет, тральщик, середній підводний човен (у надводному стані)	600–1000	8–10 x 50–60	12	5	2
3	Десантний корабель (середній, великий)	7000–10000	6,7–23 x 76–183	17	8	4
4	Фрегат, есмінець	1500–9000	15–21 x 120–175	30	12	5
5	Авіаносець, крейсер	10000–17000	17–75 x 170–302	40	19	8

Примітка. У табл. 1 не розглядаються об'єкти менших розмірів через їх обмежені можливості щодо перебування у відкритому морі.

З урахуванням даних, наведених у табл. 1, для забезпечення правильного виявлення більшості надводних рухомих об'єктів з імовірністю вище 95% просторова роздільна здатність КА має становити не гірше 8 м на піксель. У даному контексті слід зазначити, що, у разі руху надводного об'єкта за ясної погоди та спокійного моря, він може бути виявлений і з гіршою просторовою роздільною здатністю.

Зазвичай одночасно з виконанням завдання виявлення надводних рухомих об'єктів вирішується також завдання розпізнавання виявлених об'єктів. Якщо вести мову про необхідність розпізнавання надводних рухомих об'єктів до типу, то слід використовувати космічні системи з високою та надвисокою просторовою роздільною здатністю (до 3 м та до 1 м відповідно).

У світі найбільшу кількість КА оптико-електронного спостереження з високою та надвисокою просторовою роздільною здатністю мають США та КНР [19, 20]. Найбільшим у світі оператором оптико-електронного спостереження є компанія «PlanetLab» (США). Компанія експлуатує на навколоземній орбіті близько 190 КА з високою та надвисокою просторовою роздільною здатністю [19, 20].

Сектор безпеки й оборони України відповідно до Стратегічного оборонного бюлетеня [2] отримує результати космічної діяльності через Національний центр управління та випробування космічних засобів (НЦУВКЗ) Державного космічного агентства (ДКА) України. Виходячи з аналізу державних закупівель [22], спеціалісти НЦУВКЗ мають доступ до баз даних видових зображень оператора «PlanetLab» (США) через веб-ресурс [23]. Також НЦУВКЗ періодично здійснює оренду бортового ресурсу КА «SuperView» (КНР) та «EROS-B» (Ізраїль) (рис. 1).

Зазначені КА також використовуються Європейським агентством з безпеки на морі для оперативного виявлення морських суден (система «SafeSeaNet») та фактів забруднення

моря (система «CleanSeaNet») [24]. Вказане агентство використовує дані з 14 КА оптико-електронного спостереження та 6 радіолокаційного моніторингу. За таких умов оперативність отримання даних становить до 20 хвилин. При цьому за добу здійснюється моніторинг площі близько 3 000 000 кв. км, з яких знімання проводиться на території близько 500 000 кв. км, для чого потрібно близько 5000 видових зображень. Для порівняння площа виключної (морської) економічної зони України до анексії території АР Крим становила 137 000 кв. км (загальна площа Чорного моря – близько 422 000 кв. км) [25].

Слід зазначити і те, що спеціалістами НЦУВКЗ та інших підприємств ДКА України ведеться активна робота щодо створення та введення в експлуатацію вітчизняних КА дистанційного зондування Землі [26]. Зведені дані щодо технічних характеристик КА оптико-електронного спостереження, що використовувалися НЦУВКЗ у 2020–2021 роках (на основі аналізу публічних закупівель), наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Список КА, бортовий ресурс яких орендується НЦУВКЗ

№ з/п	Назва КА	Оператор	Країна	Висота орбіти, км	Роздільна здатність, м	Ширина смуги огляду, км
1	«SuperView-1» (1, 2, 3, 4)	«Space Will»	КНР	500	0,5	12
2	«Eros-B»	«ImageSat»	Ізраїль	500	0,7	7
3	«SkySat»	«PlanetLab»	США	600	0,57	5,5
				500	0,65	5,9
				400	0,86	8
				475	3,1	27
4	«Dove»			475	3,1	27
5	«RapidEye»			630	5	77
6	«Sentinel-2» (A, B)	«European Space Agency»	ЄС	786	10	290
					20	

З табл. 2 видно, що співробітники НЦУВКЗ, використовуючи КА оптико-електронного спостереження, можуть здійснювати як виявлення, так і розпізнавання до типу більшості надводних рухомих об'єктів.

Однак у разі виявлення надводних рухомих об'єктів з використанням КА оптико-електронного спостереження виникають такі обмеження: погодні умови, час доби, вузька смуга огляду, обмежений час знімання, тривалий період оновлення даних. Часткове усунення зазначених недоліків можливе через використання доступу до баз даних оператора «PlanetLab» (США), який експлуатує на навколосемній орбіті найбільше угруповання КА оптико-електронного спостереження (близько 190 апаратів з перспективою нарощення) та забезпечує квазіпостійний моніторинг земної поверхні з просторовою роздільною здатністю 3,1 м.

Космічні системи радіолокаційного спостереження

Усунення більшості недоліків, притаманних КА оптико-електронного спостереження під час виявлення рухомих надводних об'єктів, можливе через використання космічних систем радіолокаційного спостереження [23, 24]. Однак зазначені системи мають гіршу просторову роздільну здатність, а також тривалий час оновлення даних через невелику кількість доступних для комерційного використання КА. Зокрема, станом на 2021 рік на

навколоземну орбіту виведено близько 90 КА, що забезпечують радіолокаційне знімання земної поверхні. Проте для комерційного використання доступні лише 30 апаратів, 18 з яких виведені на навколоземну орбіту у 2020–2021 роках [19, 20]. Найбільшими угрупованнями КА радіолокаційного спостереження, доступними для комерційного використання, володіють оператори: «ICEYE» (12 КА) та «Capella Space» (6 КА). Крім того, про плани створення угруповання КА радіолокаційного спостереження оголосили оператори: «PlanetLab», «UrTheCast», «iQPS», «Synspective», «QianSheng», «SmartSatellite», «Spacety» [27].

З метою отримання доступу до знімків з КА радіолокаційного спостереження між керівництвом ДКА України та Європейською комісією підписано міжнародну угоду про створення на базі НЦУВКЗ Регіонального дзеркального сайту програми «Copernicus» [23]. У результаті цього з 01.12.2019 існує можливість отримувати доступ до архівних радіолокаційних зображень КА «Sentinel-1 (A, B)». Даний сервіс також успішно використовується для виявлення морських суден у всьому світі. Технічні характеристики КА «Sentinel-1 (A, B)» та інших апаратів наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Технічні характеристики КА радіолокаційного спостереження

№ з/п	Назва КА	Оператор	Країна	Висота орбіти, км	Роздільна здатність, м	Ширина смуги огляду, км
1	2	3	4	5	6	7
НЦУВКЗ укладено договір на використання						
1	«Sentinel-1 (A, B)»	«ESA»	ЄС (2 КА)	693	5–80	80–400
Можливість укладання договорів на використання						
КА радіолокаційного спостереження комерційного призначення						
1	«ICEYE-X 2, 4–13, 15»	«ICEYE»	Фінляндія (12 КА)	550	1	5–15
2	«Capella 1–6»	«Capella Space»	США (7 КА)	535	0,5–1,2	5–20
3	«Umbra-SAR» (2001)	«Umbra»		500–600	0,15–1	16 km ²
4	«QPS-SAR 1, 2»	«iQPS»	Японія (3 КА)	550	1	–
5	«Strix-Alpha»	«Synspective»		500–600	1–3	10–30
6	«RadarSat-2»	«CSA»	Канада (1 КА)	798	3–100	20–500
7	«Hisca-1»	«Spacety»	КНР (1 КА)	500	1–20	5–100
КА радіолокаційного спостереження подвійного та військового призначення						
1	«FIA Radar 1–5»	МО	США (7 КА)	1100	–	–
2	«Lacrosse 4, 5»			650	–	–
3	«SAR-Lupe 1–5»	МО	ФРН (7 КА)	500	0,5–1	5,5–8
4	«TerraSAR-X»	Уряд		500	1–16	10–100
5	«TanDEM-X»			500	1–18,5	10–100
6	«RISat 1, 2, 2B, 2RB1»	МО	Індія (5 КА)	555	1–50	10–225
7	«EOS-1»					
8	«RCM 1–3»	Уряд	Канада (3 КА)	584	3–100	20–500
9	«IGS 5, 6, 7A, 8A, 9A»	МО	Японія (7 КА)	500	1	–
10	«Daichi-2»	«JAXA»		630	1–60	25–490
11	«Asnaro 2»	Уряд		500	1–16	10–50
12	«COSMO-SKYMED 1–4»	МО	Італія (5 КА)	623	1–100	10–200
13	«CSG-1»				0,8–20	10–200
14	«Gaofen 3, 12»	Уряд	КНР (9 КА)	610–750	1–500	10–650

Кінець таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7
15	«Yaogan 10, 14, 21, 23, 33»	МО		500–700	–	–
16	«Qilu 1»	Уряд		500	0,5	–
17	«HJ-1C»	Уряд		430	20	100
18	«Nova-Sar-1»	«SST»	Великобританія (1 КА)	590	6–45	13–195
19	«Paz»	«Hisdesat»	Іспанія (1 КА)	510	1–16	5–100
20	«Ofeq-10»	МО	Ізраїль (2 КА)	385–610	–	–
21	«TecSAR»			405–580	0,5–20	5–100
22	«Kompasat-5»	«KARI»	Південна Корея (1 КА)	545	1–20	5–100
23	«SAOCOM 1A, 1B»	«CONAE»	Аргентина (2 КА)	625	10–100	20–350

З викладеного випливає, що станом на 2021 рік НЦУВКЗ має обмежені можливості щодо доступу до даних радіолокаційного спостереження. Однак на даний час уже існує можливість укладання комерційних угод для отримання відповідних даних, а також підписання міжурядових угод.

Космічні системи радіомоніторингу

Поряд зі згаданими системами для виявлення морських суден також використовуються космічні системи радіомоніторингу. Зокрема, станом на 2021 рік на навколоремній орбіті експлуатується близько 122 КА радіомоніторингу [19, 20]. Однак серед вказаної кількості лише 29 на даний час доступні для комерційного використання. Майже всі вони виведені на навколоремну орбіту у 2020 – 2021 роках. Найбільшими комерційними операторами КА радіомоніторингу є: «HawkEye360» (9), «Kleos Space» (8), «Ningxia Jingui» (5), «Unseenlabs» (4) та «Aurora Insight» (3) (див. табл. 4). Решта КА експлуатуються військовими відомствами КНР, США, Франції, РФ та Індії. НЦУВКЗ на даний час не використовує подібних систем у своїй діяльності [19, 20].

Таблиця 4

Комерційні КА радіомоніторингу

№ з/п	Назва КА	Оператор	Країна	Дата запуску	Висота орбіти, км	Діапазон частот, МГц
1	2	3	4	5	6	7
1	«Hawk A, B, C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B, 3C»	«HawkEye360»	США (9 КА)	03.12.2018 24.01.2021 30.06.2021	550	144–15000
2	«KSM-1A, B, C, D» «KSF1-A, B, C, D»	«Kleos Space»	Люксембург (8 КА)	07.11.2020 30.06.2021	530	–
3	«Ningxia-2 01, 02, 03, 04, 05»	«Ningxia Jingui Information Technology»	КНР (5 КА)	09.07.2021	850	–
4	«BRO-1, 2, 3, 4»	«Unseenlabs»	Франція (4 КА)	19.08.2019 19.11.2020 17.08.2021	550	–
5	«Alpha» «Charlie» «Bravo»	«Aurora Insight»	США (3 КА)	03.12.2018 24.01.2021 28.04.2021	570	5G, 4G, LTE, 3G, IoT, CBRS, Wi-Fi та ін..

Космічні системи інфрачервоного моніторингу

Даних щодо використання космічних систем інфрачервоного моніторингу земної поверхні для виявлення надводних рухомих об'єктів на даний час у відкритому доступі немає. Можна припустити, що це обумовлено низькою просторовою роздільною здатністю подібних цивільних КА, а також впливом атмосфери на можливість проведення вимірювань у невеликому діапазоні температур. Однак низка компаній вже оголосили про наміри створення угруповань КА з високим просторовим розрізненням для дистанційного зондування Землі в інфрачервоних діапазонах: «Aistech», «Planetary Resources», «QianSheng», «AlbedoSpace» [27].

Висновки. Використання космічних систем для виявлення надводних рухомих об'єктів є доцільним, що підтверджується міжнародним досвідом. Так, космічні системи дозволяють доповнювати дані, отримані стаціонарними та мобільними засобами висвітлення надводної обстановки. Їх застосування дозволить збільшити ефективність функціонування створюваної державної інтегрованої системи висвітлення надводної та підводної обстановки в акваторіях Чорного й Азовського морів та басейнів річок Дніпро і Дунай, а також системи С4ISR Збройних Сил України. Зазначене дозволить покращити ситуаційну обізнаність у межах виключної (морської) економічної зони України. Особливо гостро питання використання космічних систем постає в разі необхідності забезпечення моніторингу значних територій в умовах можливої збройної агресії, дії радіоперешкод або у складних погодних умовах.

У короткостроковій перспективі Україна експлуатуватиме на навколоремній орбіті власні КА оптико-електронного та радіолокаційного спостереження, що збільшує актуальність дослідження. Станом на грудень 2021 року сектор безпеки і оборони України вже має можливість здійснювати виявлення надводних рухомих об'єктів із використанням космічних систем оптико-електронного спостереження. Зокрема, НЦУВКЗ налагоджено отримання даних з КА оптико-електронного спостереження, що забезпечують квазіпостійне оновлення даних з просторовою роздільною здатністю не гірше 3,1 м, що дозволяє виявляти та розпізнавати більшість надводних рухомих об'єктів за ясної погоди у світлий час доби. В окремих дослідженнях також розглядається можливість використання КА оптико-електронного спостереження для виявлення надводних рухомих об'єктів і в темний час доби через фіксацію випромінювання габаритних вогнів морських суден.

Крім того, на даний час можливим є комерційне використання космічних систем радіолокаційного спостереження та радіомоніторингу, що дозволяють виявляти морські судна незалежно від погодних умов та часу доби. НЦУВКЗ вже ведеться робота з обробки архівних зображень з радіолокаційних КА.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 25 березня 2021 року «Про Стратегію воєнної безпеки України» : Указ Президента України від 25.03.2021 № 121/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/121/2021> (дата звернення: 24.11.2021).
2. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 серпня 2021 року «Про Стратегічний оборонний бюлетень України» : Указ Президента України від

17.09.2021 № 473/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473/2021#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

3. Про невідкладні заходи щодо захисту національних інтересів на Півдні та Сході України, у Чорному та Азовському морях і Керченській протоці : рішення Ради національної безпеки та оборони України від 12.10.2018 № 0011525. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0011525-18#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

4. Про Річну національну програму під егідою Комісії Україна – НАТО на 2021 рік : Указ Президента України від 11.05.2021 № 189/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/189/2021#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

5. Про схвалення Концепції створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження) : розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.07.2003 № 410-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/410-2003-%D1%80#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

6. Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об'єктами (зв'язок, навігація, спостереження) : постанова Кабінету Міністрів України від 17.08.2008 № 834. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/834-2008-%D0%BF#Text/> (дата звернення: 24.11.2021).

7. Про затвердження плану першочергових заходів з облаштування державного кордону вздовж берегової лінії та забезпечення охорони територіального моря України в межах Донецької, Запорізької, Херсонської та Миколаївської областей : розпорядження Кабінету Міністрів України від 13.10.2015 № 1068-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1068-2015-%D1%80#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

8. Про підвищення обороноздатності і безпеки держави в частині створення сучасної системи висвітлення надводної обстановки : постанова Кабінету Міністрів України від 11.11.2015 № 926. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2015-%D0%BF#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

9. Про схвалення Стратегії розвитку Державної прикордонної служби : розпорядження Кабінету Міністрів України від 23.11.2015 № 1189-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1189-2015-%D1%80#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

10. Про схвалення Основних напрямів розвитку озброєння та військової техніки на довгостроковий період : розпорядження Кабінету Міністрів України від 14.06.2017 № 398-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/398-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

11. Про схвалення Стратегії імплементації положень директив та регламентів Європейського Союзу у сфері міжнародного морського та внутрішнього водного транспорту («дорожньої карти») : розпорядження Кабінету Міністрів України від 11.10.2017 № 747-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/747-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

12. Про внесення змін до Морської доктрини України на період до 2035 року : постанова Кабінету Міністрів України від 18.12.2018 № 1108. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1108-2018-%D0%BF#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

13. Про схвалення Стратегії інтегрованого управління кордонами на період до 2025 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2019 № 687-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-2019-%D1%80#Text> (дата звернення: 24.11.2021).

14. Трофименко І. Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення судноводіння з використанням радіолокаційних систем // Новітні технології. 2017. № 2. С. 29–42.
15. Riddolls R. J. A Canadian perspective on high frequency over-the-horizon radar // Defence R&D Canada : Technical Report, DREO TR 2006-285. December 2006. P. 62.
16. Dall'Armi-Stoks G., Morris Guy, Yau Annie. Development of a Maritime Electronic Warfare and Sensor Systems // EMI Mathematical Assessment Capability. 2007. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISEMC.2007.184.
17. Reding Dale. The technological challenges of maritime information warfare. 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/COMCAS.2015.7360497.
18. Про затвердження Правил метеорологічного забезпечення польотів державної авіації України : наказ Міністра оборони України від 29.09.2015 № 516. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1264-15#Text> (дата звернення: 24.11.2021).
19. Космічний каталог. URL: <https://celestrak.com/satcat/search.php> (дата звернення: 24.11.2021).
20. UCS Satellite Database. URL: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database> (last accessed: 24.11.2021).
21. Leachtenauer Jon. Resolution requirements and the Johnson criteria revisited // SPIE Proceedings. 2003. Vol. 5076. 15 p. DOI: 10.1117/12.497896.
22. Публічні закупівлі Національного центру управління та випробування космічними засобами України. URL: <https://spacecenter.gov.ua/%d0%b4%d1%96%d1%8f%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d1%96%d1%81%d1%82%d1%8c-%d1%86%d0%b5%d0%bd%d1%82%d1%80%d1%83/publichni-zakupivli> (дата звернення: 24.11.2021).
23. Горбулін В., Мосов С. Космічна складова геоінформаційного забезпечення ухвалення управлінських рішень з питань національної безпеки і оборони // Оборонний вісник Центру воєнної політики та політики безпеки. 2021. № 8. С. 4–11. URL: https://spacecenter.gov.ua/contents/uploads/2021/10/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D0%B2%20%D0%9E%D0%92_%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%B1%D1%83%D0%BB%D1%96%D0%BD_%D0%9C%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B2_2021.pdf (дата звернення: 24.11.2021).
24. Каталог даних Європейського агентства морської безпеки. URL: <http://www.emsa.europa.eu/copernicus.html> (дата звернення: 24.11.2021).
25. Кравченко Н. Міжнародно-правові статус і режим виключної економічної зони й відкритого моря: порівняльна характеристика // ScienceRise: Juridical Science. 2020. № 3 (13). С. 44–50. DOI: 10.15587/2523-4153.2020.214010.
26. Шульга О. Космічне угруповання супутників України: що відомо та які перспективи. URL: https://defence-ua.com/minds_and_ideas/kosmichne_ugrupuvannja_suputnikov_ukrajini_scho_vidomo_ta_jaki_perspektivi-5409.html (дата звернення: 24.11.2021).
27. Kulu Erik. Satellite Constellations – 2021. Industry Survey and Trends. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2021/all2021/218/> (last accessed: 24.11.2021).

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021.

REFERENCES

1. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 25 bereznia 2021 roku «Pro Stratehiiu voiennoi bezpeky Ukrainy» : Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 25.03.2021 № 121/2021 [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of March 25, 2021 "On the Strategy of Military Security of Ukraine": Decree of the President of Ukraine of 25.03.2021 № 121/2021]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/121/2021> [in Ukrainian].
2. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 20 serpnia 2021 roku «Pro Stratehichniy oboronnyi biuleten Ukrainy» : Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 17.09.2021 № 473/2021 [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of August 20, 2021 "On the Strategic Defense Bulletin of Ukraine": Decree of the President of Ukraine of 17.09.2021 № 473/2021]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473/2021#Text> [in Ukrainian].
3. Pro nevidkladni zakhody shchodo zakhystu natsionalnykh interesiv na Pivdni ta Skhodi Ukrainy, u Chornomu ta Azovskomu moriakh i Kerchenskii prototsi : rishennia Rady natsionalnoi bezpeky ta oborony Ukrainy vid 12.10.2018 № 0011525 [On urgent measures to protect national interests in the South and East of Ukraine, in the Black and Azov Seas and the Kerch Strait: decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated 12.10.2018 № 0011525]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0011525-18#Text> [in Ukrainian].
4. Pro Richnu natsionalnu prohramu pid ehidoiu Komisii Ukraina – NATO na 2021 rik : Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 11.05.2021 № 189/2021 [On the Annual National Program under the auspices of the NATO-Ukraine Commission for 2021: Decree of the President of Ukraine of 11.05.2021 № 189/2021]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/189/2021#Text> [in Ukrainian].
5. Pro skhvalennia Kontseptsii stvorennia derzhavnoi intehrovanoi informatsiinoi systemy zabezpechennia upravlinnia rukhomymy ob'iektamy (zv'iazok, navihatsiia, sposterezhennia) : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 17.07.2003 № 410-p [About approval of the Concept of creation of the state integrated information system of maintenance of management of mobile objects (communication, navigation, supervision): the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 07/17/2003 № 410-p]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/410-2003-%D1%80#Text> [in Ukrainian].
6. Pro zatverdzhennia Derzhavnoi tsilovoi naukovu-tekhnichnoi prohramy stvorennia derzhavnoi intehrovanoi informatsiinoi systemy zabezpechennia upravlinnia rukhomymy ob'iektamy (zv'iazok, navihatsiia, sposterezhennia) : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 17.08.2008 № 834 [About the statement of the State target scientific and technical program of creation of the state integrated information system of maintenance of management of mobile objects (communication, navigation, supervision): the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 17.08.2008 № 834]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/834-2008-%D0%BF#Text/> [in Ukrainian].
7. Pro zatverdzhennia planu pershocherhovykh zakhodiv z oblashtuvannia derzhavnoho kordonu vzdovzh berehovoii linii ta zabezpechennia okhorony terytorialnoho moria Ukrainy v mezhakh

Donetskoi, Zaporizkoi, Khersonskoi ta Mykolaivskoi oblasti : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 13.10.2015 № 1068-p [On approval of the plan of priority measures for the arrangement of the state border along the coastline and protection of the territorial sea of Ukraine within the Donetsk, Zaporizhia, Kherson and Mykolaiv regions: order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 13.10.2015 № 1068-p]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1068-2015-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

8. Pro pidvyshchennia oboronozdatnosti i bezpeky derzhavy v chastyni stvorennia suchasnoi systemy vysvitlennia nadvodnoi obstanovky : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.11.2015 № 926 [On improving the defense capabilities and security of the state in terms of creating a modern system of lighting the surface situation: the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 11.11.2015 № 926]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2015-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].

9. Pro skhvalennia Stratehii rozvytku Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 23.11.2015 № 1189-p [On approval of the Strategy for the development of the State Border Guard Service: order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 23.11.2015 № 1189-p]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1189-2015-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

10. Pro skhvalennia Osnovnykh napriamiv rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky na dovhostrokovi period : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 14.06.2017 № 398-p [On approval of the Main directions of development of armaments and military equipment for the long term: order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 14.06.2017 № 398-p]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/398-2017-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

11. Pro skhvalennia Stratehii implementatsii polozhen dyrektyv ta rehlamentiv Yevropeiskoho Soiuzu u sferi mizhnarodnoho morskoho ta vnutrishnoho vodnoho transportu («dorozhnoi karty») : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.10.2017 № 747-p [On approval of the Strategy for implementation of the provisions of directives and regulations of the European Union in the field of international maritime and inland water transport ("road map"): order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 11.10.2017 № 747-p]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/747-2017-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

12. Pro vnesennia zmin do Morskoj doktryny Ukrainy na period do 2035 roku : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 18.12.2018 № 1108 [On Amendments to the Maritime Doctrine of Ukraine for the Period up to 2035: resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of December 18, 2018 № 1108]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1108-2018-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].

13. Pro skhvalennia Stratehii intehrovanoho upravlinnia kordonamy na period do 2025 roku : rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 24.07.2019 № 687-p [On approval of the Strategy of integrated border management for the period up to 2025: order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 24.07.2019 № 687-p]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/687-2019-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

14. Trofymenko, I. (2017). Vyznachennia perspektyvnykh napriamkiv rozvytku navihatsiinoho zabezpechennia sudnovodinnia z vykorystanniam radiolokatsiinykh system [Determination of perspective directions of development of navigation support of navigation with the use of radar systems]. *Novitni tekhnolohii [Latest technologies]*, 2, 29–42 [in Ukrainian].

15. Riddolls, R. J. (December 2006). A Canadian perspective on high frequency over-the-horizon radar. *Defence R&D Canada: Technical Report, DREO TR 2006-285*, 62.
16. Dall'Armi-Stoks, G., Morris Guy, & Yau Annie. (2007). Development of a Maritime Electronic Warfare and Sensor Systems. *EMI Mathematical Assessment Capability*, 1–5. DOI: 10.1109/ISEMC.2007.184
17. Reding Dale. (2015). *The technological challenges of maritime information warfare*, 1–5. DOI: 10.1109/COMCAS.2015.7360497
18. Pro zatverdzhennia Pravyl meteorolohichnoho zabezpechennia polotiv derzhavnoi aviatsii Ukrainy : nakaz Ministra oborony Ukrainy vid 29.09.2015 № 516 [On approval of the Rules of meteorological support of flights of the state aviation of Ukraine: order of the Minister of Defense of Ukraine of 29.09.2015 № 516]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1264-15#Text> [in Ukrainian].
19. *Kosmichnyi katalog* [Space catalog] (n.d.). Retrieved from <https://celestrak.com/satcat/search.php> [in Ukrainian].
20. *UCS Satellite Database* (n.d.). URL: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>
21. Leachtenauer Jon. (2003). Resolution requirements and the Johnson criteria revisited. *SPIE Proceedings, Vol. 5076*. DOI: 10.1117/12.497896
22. *Publichni zakupivli Natsionalnoho tsentru upravlinnia ta vyprobuvannia kosmichnymy zasobamy Ukrainy* [Public procurement of the National Center for Space Management and Testing of Ukraine]. (n.d.). Retrieved from <https://spacecenter.gov.ua/%d0%b4%d1%96%d1%8f%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d1%96%d1%81%d1%82%d1%8c-%d1%86%d0%b5%d0%bd%d1%82%d1%80%d1%83/publichni-zakupivli> [in Ukrainian].
23. Horbulin, V., & Mosov, S. (2021). Kosmichna skladova heoinformatsiinoho zabezpechennia ukhvalennia upravlinskykh rishen z pytan natsionalnoi bezpeky i oborony [Space component of geoinformation support for management decisions on national security and defense]. *Oboronnyi visnyk Tsentru voiennoi polityky ta polityky bezpeky* [Defense Bulletin of the Center for Military and Security Policy], 8, 4–11. Retrieved from https://spacecenter.gov.ua/contents/uploads/2021/10/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D0%B2%20%D0%9E%D0%92_%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%B1%D1%83%D0%BB%D1%96%D0%BD_%D0%9C%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B2_2021.pdf
24. *Katalog danykh Yevropeiskoho ahentstva morskoi bezpeky* [Catalog of data of the European Maritime Safety Agency]. (n.d.). Retrieved from <http://www.emsa.europa.eu/copernicus.html> [in Ukrainian].
25. Kravchenko, N. (2020). Mizhnarodno-pravovi status i rezhym vykliuchnoi ekonomichnoi zony y vidkrytoho moria: porivnialna kharakterystyka [International legal status and regime of the exclusive economic zone and the high seas: a comparative characteristic]. *ScienceRise: Juridical Science*, 3 (13), 44–50. DOI: 10.15587/2523-4153.2020.214010 [in Ukrainian].
26. Shulha, O. (n.d.). *Kosmichne uhrupuvannia suputnykiv Ukrainy: shcho vidomo ta yaki perspektyvy* [Space grouping of Ukrainian satellites: what is known and what are the prospects]. Retrieved from https://defence-ua.com/minds_and_ideas/kosmichne_ugrupuvannja_suputnykiv_ukrajini_scho_vidomo_ta_jaki_perspektivi-5409.html [in Ukrainian].
27. Kulu Erik. (n.d.). *Satellite Constellations – 2021. Industry Survey and Trends*. Retrieved from <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2021/all2021/218/>

S. P. Fryz, R. O. Avsiievych

ANALYSIS OF SPACE SYSTEMS FOR MOBILE WATER SURFACE OBJECTS MONITORING

In the context of Russian Federation aggression against Ukraine, there is an urgent need to increase the number of sources of reliable information about mobile water surface objects in the Black Sea and the Sea of Azov.

Space systems for mobile water surface objects monitoring should be considered as sources of relevant information. This is due to the fact that space systems make it possible to quickly detect, identify and observe mobile water surface objects under various weather conditions at a distance that far exceeds the range of radio visibility between the data reception point and the observation object. Also in this case, there are no threats to the life and health of the system operator.

The use of space systems in the system of monitoring of mobile water surface objects in the interests of the security and defense sector of Ukraine will contribute to achieving the rates specified in the National Security Strategy of Ukraine, Military Security Strategy of Ukraine, Strategic Defense Bulletin, Strategy of the Naval Forces of the Armed Forces of Ukraine 2035, Visions for the Ukrainian Navy 2035, Visions for the Development of the Armed Forces of Ukraine 2030. In particular, it is expected to increase the capabilities of the Navy, provided by a single list (catalog) of capabilities of the Ministry of Defense of Ukraine, the Armed Forces of Ukraine and other defense forces. In addition, the successful solution of the task of receiving data on mobile water surface objects from space systems will contribute to the development of Ukraine as a space state.

Further research on the selected topic will focus on the possibility of creating a universal automated system for receiving data from space systems for monitoring mobile water surface objects. It is also possible to study the issue of receiving data from space systems on the geospatial position of mobile objects in the airspace and on the ground.

Keywords: *water surface situation; exclusive (maritime) economic zone; space system; radio line; optical imaging, radar imaging, satellite spectrum monitoring, C4ISR.*

С. С. Гаценко, А. В. Муравйов, Р. М. Мамайсур, С. В. Мостовий, Д. В. Пятак

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДСИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ СИСТЕМИ РОЗВІДКИ

Система розвідки є багаторівневою системою спостереження, одним із першочергових завдань якої є розпізнавання визначених об'єктів. Наприклад, у системі радіоелектронної розвідки тип радіо- і радіолокаційних засобів є ознакою визначення оперативно-тактичної належності радіомережі або радіотехнічної системи, водночас встановлення типу радіо- і радіотехнічної станції є одним із завдань розпізнавання спостережуваних об'єктів.

Процес розпізнавання – це різновид класифікації. Його принципом є поділ інформації на апостеріорну й апіорну. Апостеріорні дані про об'єкт розвідки зіставляють з апіорною інформацією із застосуванням відповідних алгоритмів.

Розпізнавання використовують для встановлення оперативно-тактичної належності окремих радіоелектронних засобів, мереж, вузлів зв'язку, пунктів управління військами, а також для врахування впливу протидії противником. Деякі процеси можуть бути одночасно і завданнями обробки, наприклад, систематизація відомостей, даних, ознак тощо.

На сьогодні в низці робіт зроблено спроби щодо розширення ознакового простору й удосконалення науково-методичного апарату розпізнавання. Ці дослідження спрямовані на підвищення системних показників, зокрема ймовірності правильного розпізнавання. Для того, щоб визначити, наскільки змінилася дана величина залежно від різних факторів, застосовують методи математичного моделювання функціонування системи, а також лабораторні й натурні експерименти. Використання останніх пов'язане з певними труднощами, особливо коли мова йде про складну динамічну систему розвідки щодо діяльності іноземних держав у просторі, засоби вимірювання якої мають широку географію розташування й відрізняються різними особливостями функціонування. Для оцінювання основних показників системи розвідки й забезпечення можливості оптимального вибору засобів вимірювання параметрів спостережуваних об'єктів у статті розроблено модель функціонування її підсистеми розпізнавання.

Застосування запропонованої математичної моделі дозволить вирішувати завдання, пов'язані з побудовою систем розпізнавання й визначенням необхідної кількості ознак.

Ключові слова: система; модель; розпізнавання; ознаки; об'єкт розвідки; ентропія.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Одним із завдань системи розвідки щодо об'єктів спостереження є розпізнавання [1]. На даний момент у низці робіт живають спроби щодо розширення ознакового простору й удосконалення науково-методичного апарату розпізнавання [2–5]. Ці роботи спрямовані на поліпшення системних показників, зокрема ймовірності правильного розпізнавання. Для того, щоб визначити, наскільки змінилася дана величина залежно від різних факторів, застосовують методи математичного моделювання функціонування системи, а також лабораторні й натурні експерименти.

© С. С. Гаценко, А. В. Муравйов, Р. М. Мамайсур, С. В. Мостовий, Д. В. Пятак, 2021

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розпізнавання – основа інформаційної технології, що перетворює потоки вхідної розвідувальної інформації (показники, параметри, ознаки образів, об'єктів) у вихідну, подану висновком про те, до якого класу належить розпізнаваний образ [1, 3]. Сутність інформаційного процесу в системі радіомоніторингу полягає у викритті (розпізнаванні) спостережуваних об'єктів за працюючими джерелами розвідувальних відомостей противника та наданні вищим органам управління висновків про його угруповання в смузі радіорозвідки, наміри, задуми і можливості. Розпізнавані об'єкти визначають за відповідними ознаками [2–5].

З [2, 4, 5] відомо, що зі збільшенням кількості ознак, які характеризують об'єкт розвідки, збільшується час, необхідний для його ідентифікації, та зростають інші затрати, передусім апаратні, унаслідок чого знижується оперативність процесу розпізнавання. Чинні методики не дозволяють одночасно використовувати кількісні та якісні розвідувальні ознаки в ході визначення важливості джерел розвідувальних відомостей в інтересах викриття стану об'єктів розвідки, що ускладнює автоматизацію процесу вибору цих джерел для ведення розвідки.

Формулювання завдання дослідження. Модель функціонування системи розпізнавання об'єктів розвідки можна подати в такому вигляді:

$$P_{\text{доц}} \geq P_{\text{нотр}} \text{ при } P_{\text{доц}} = \max P(N, M, C_n^m, P^{\text{ном}}),$$

де N – кількість ознак розпізнавання, $n = 1, 2, \dots, N$;

M – кількість класів розпізнавання, $m = 1, 2, \dots, M$;

C_n^m – вектор вагових коефіцієнтів;

$P^{\text{ном}}$ – імовірність помилок розпізнавання;

$P_{\text{нотр}}$ – імовірність правильного розпізнавання.

Метою статті є підвищення ефективності застосування інформаційних ресурсів розвідувальних засобів щодо викриття об'єктів розвідки для заданих умов та їх раціональний розподіл шляхом розроблення математичної моделі підсистеми розпізнавання системи розвідки.

Виклад основного матеріалу. Для оцінювання ефективності підсистеми розпізнавання системи розвідки скористаємося методом статистичних випробувань [6] із застосуванням математичного моделювання. Структурну схему математичної моделі функціонування підсистеми розпізнавання наведено на рис. 1, де використано такі позначення: БВООР – блок визначення обсягу ознак розпізнавання; БФРО – блок формування об'єктів розвідки для розпізнавання; БВКОР – блок визначення кількості об'єктів розвідки для розпізнавання; БВККР – блок визначення кількості класів розпізнавання; БПР – блок помилок розпізнавання; БР – блок розпізнавання; БВІ – блок визначення інформативності; БП – блок розрахунку; БОЕ – блок оцінювання ефективності; ДВЧ – датчик випадкових чисел, у якому генеруються випадкові числа відповідно до біноміального закону розподілу й імовірності правильного розпізнавання на підставі відповідної ознаки.

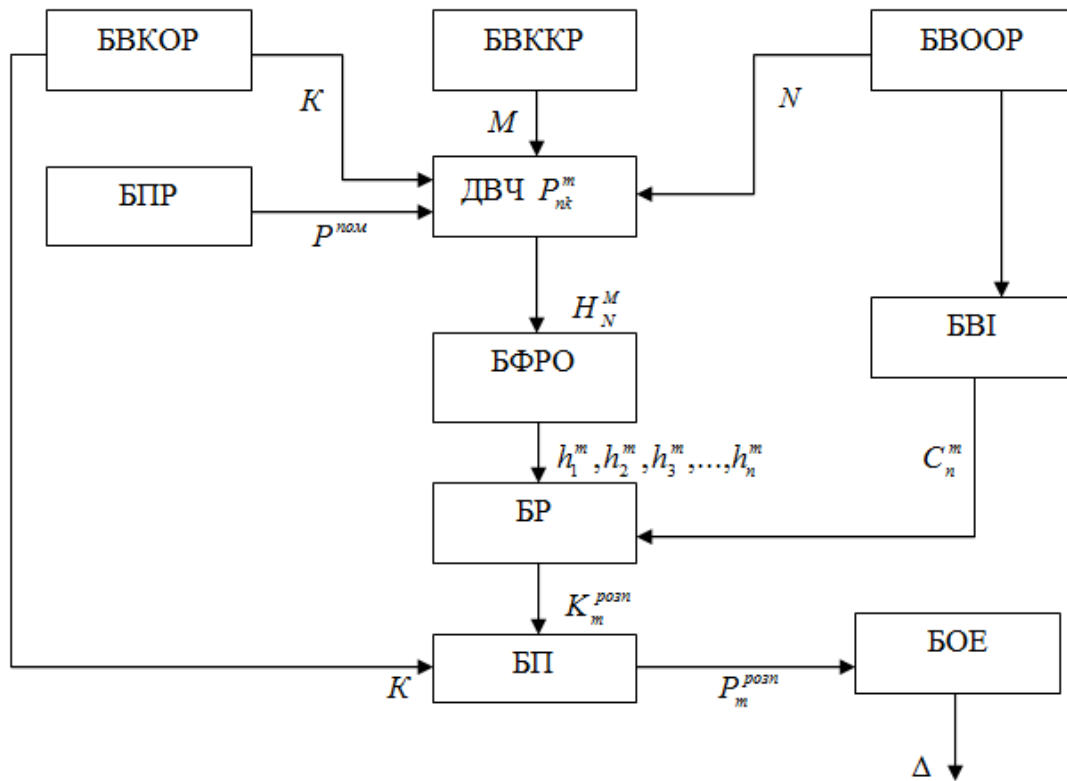


Рис. 1. Структурна схема математичної моделі функціонування системи розпізнавання

Після того, як задані вихідні дані для проведення кожного розпізнавання за допомогою ДВЧ, формується модель об'єкта розвідки (кількість даних об'єктів визначається величиною K), належність до певного класу заздалегідь відома. Імовірності правильного розпізнавання відповідного класу P_n^m ($m = 1, 2, \dots, M$) на підставі певної ознаки ($n = 1, 2, \dots, N$) зберігаються в блоці БФРО або задаються оператором. Формування об'єкта розвідки для розпізнавання проводиться завданням сукупності рішень на розпізнавання на підставі відповідної ознаки, які мають такий вигляд: $h_1^m, h_2^m, h_3^m, \dots, h_n^m$, де h_n^m приймає значення 1, якщо об'єкт розпізнаний на підставі даної ознаки, і 0, якщо ні. Кожен об'єкт розпізнавання класу Ω_m є багатомірною випадковою величиною із заданим законом розподілу. Отже, для до k -ї кількості ситуацій розпізнавання за n -ю кількістю ознак m -го класу розпізнавання отримана така матриця розмірністю $K \times N$:

$$H'_{nk} = \begin{pmatrix} h'_{11} & h'_{12} & \dots & h'_{1N} \\ h'_{21} & h'_{22} & \dots & h'_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h'_{K1} & h'_{K2} & \dots & h'_{KN} \end{pmatrix}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (1)$$

де K – кількість об'єктів розвідки, що розпізнаються, $k = 1, 2, \dots, K$.

Числові значення $h_1^m, h_2^m, h_3^m, \dots, h_n^m$ зазнають випадково викривлення (залежно від величини ймовірності помилки розпізнавання $P^{ном}$). Це імітує різні помилки в процесі

розпізнавання на підставі ознак, отриманих із використанням засобів розвідки, що мають різні вимірювальні характеристики точності. Для цього сформуємо таку матрицю помилок:

$$P_{nk}^{nom} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{K1} & p_{K2} & \dots & p_{KN} \end{pmatrix}, n = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K. \quad (2)$$

Елементи даної матриці p_{kn} приймають значення 1 у разі, якщо мала місце помилка розпізнавання, або 0, якщо ні. Далі проводиться віднімання з елементів матриці H'_{nk} елементів матриці P_{nk}^{nom} :

$$H_{nk} = H'_{nk} - P_{nk}^{nom} = \begin{pmatrix} h'_{11} & h'_{12} & \dots & h'_{1N} \\ h'_{21} & h'_{22} & \dots & h'_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h'_{K1} & h'_{K2} & \dots & h'_{KN} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{K1} & p_{K2} & \dots & p_{KN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{K1} & h_{K2} & \dots & h_{KN} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Елементи результуючої матриці H'_{nk} , взяті за модулем, будуть імітувати k -ту кількість ситуацій розпізнавання m -го класу за n -ю кількістю ознак за умови наявності помилок розпізнавання.

Невідомі об'єкти розпізнавання надходять на вхід БР, у якому приймається рішення про розпізнавання об'єкта на підставі сукупності розвідувальних ознак. Правило прийняття рішення в БР щодо істинності тієї або іншої гіпотези формулюється в такий спосіб:

якщо значення $G_{розн}^m$ задовольняє умову $G_{розн}^m > g_{онм}$, тоді справедлива гіпотеза Γ_0 , тобто об'єкт належить даному класу;

якщо значення $G_{розн}^m$ відповідає умові $G_{розн}^m \leq g_{онм}$, тоді слушна гіпотеза Γ_1 , тобто об'єкт не належить даному класу.

Величину $G_{розн}^m$ визначають за такою формулою:

$$G_{розн}^m = h_{k1}^m c_1^m + h_{k2}^m c_2^m + h_{k3}^m c_3^m + \dots + h_{kN}^m c_N^m, k = 1, 2, \dots, K, m = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

У свою чергу, значення критерію визначається так: $g_{онм} = n_{онм} \cdot C = n_{онм} \cdot \frac{1}{N}$, де C – значення вагових коефіцієнтів без визначення інформативності. А якщо ні, то вагові коефіцієнти c_n^m пропонуємо призначати, виходячи з роздільних здатностей ознак розпізнавання.

У роботі [8] під ознаками, що володіють якісними роздільними здатностями, тобто інформативними, слід розуміти ті, які зменшують невизначеність заданої ситуації розпізнавання. А мірою статистичної невизначеності є ентропія \mathcal{E} [9].

Щодо даної ситуації з урахуванням вказаних вище робіт ентропію пропонуємо розраховувати в такий спосіб:

$$\mathcal{E}_n^m = -P_n^m \lg P_n^m, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

де P_n^m – імовірності правильного розпізнавання типу об’єкта розвідки на підставі одиничної ознаки.

Результатом проведених за формулою (5) розрахунків є $N \times M$ значень ентропії.

Згідно з [9] будемо вважати більш інформативною ознакою, коли відповідне значення ентропії \mathcal{E}_n^m має мінімальне значення.

Вагові коефіцієнти пропонуємо призначити щодо мінімального значення ентропії $c_n^m = \frac{\min \mathcal{E}_n^m}{\mathcal{E}_n^m}$ з наступним нормуванням (у масштабах певного класу розпізнавання).

Отже, нормовані вагові коефіцієнти розраховуємо за такою формулою:

$$c_n^m = \frac{c_n^m \cdot 100}{\sum_{w=1}^M c_n^w}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

У свою чергу, для кожного значення N , виходячи з аналізу робіт [5, 7, 9], можна розрахувати оптимальне значення n_{opt} :

$$n_{opt} = a\sqrt{N}, \quad (7)$$

де a – величина, що встановлює граничне значення (визначаємо емпірично або експертно, у зазначених роботах воно приймається рівним $a = 1.5$).

Для розпізнавання об’єктів m -го класу оцінкою ймовірності правильного результату є відношення кількості правильних відповідей $K_{розп}^m$ до загальної кількості K , тобто

$$p_m \approx \frac{K_{розп}^m}{K^m}.$$

Після проведення розрахунків, наведених вище, отримуємо M імовірностей правильного розпізнавання відповідних класів. Для визначення ймовірності розпізнавання системи скористаємося формулою повної ймовірності [7]. Під подією A в цьому разі розуміємо факт розпізнавання об’єкта розвідки одного з M класів: $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M$, що утворюють повну групу незіставних подій. У такому разі ймовірність розпізнавання (події A) обчислюють як суму добутків імовірності розпізнавання p_m на ймовірність події за цією гіпотезою $P(A|\Omega_m)$:

$$P(A) = \sum_{m=1}^M p_m \cdot P(A|\Omega_m), \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

Апріорні ймовірності $P(A|\Omega_m)$ можуть бути розраховані як відношення кількості об'єктів розпізнавання l_m класу до загальної кількості об'єктів розвідки L , які перебувають у спостережуваній зоні (смузі) засобів розвідки.

Запропонована математична модель дозволяє знайти залежність $P(A)$ від кількості ознак та класів розпізнавання, застосування вагових коефіцієнтів, розрахованих на основі ентропійного підходу [9], і впливу різних помилок на процес виміру й розпізнавання, тобто $P(A) = P(N, M, C_n^m, P^{ном})$.

У БОЕ зберігаються значення ймовірності правильного розпізнавання з позначенням умов, за яких вони були розраховані. Знак (\pm) і величина різниці між вимірюваним значенням, що зберігаються в пам'яті, $\Delta = P'(N', M', C_n^m, P^{ном}) - P(N, M, C_n^l, P^{ном})$ відображають ефективність системи розпізнавання ($m \neq l, l = 1, 2, \dots, M, v \neq n, v = 1, 2, \dots, N$). Отримані в цій рівності відомості є вихідними даними для завдань визначення складу технічних засобів розвідки, необхідного для формування ознакового простору (тобто кількості ознак N), що забезпечує розв'язання задачі розпізнавання із заданими показниками якості.

Для одержання конкретної ознаки необхідно вжити заходи, які також мають свої вимоги за часом і вартістю. Великий обсяг зазначених ресурсів, витрачених на одержання конкретної ознаки, зовсім не гарантує того, що вона, у свою чергу, буде мати високу інформативність. У даній ситуації логічним є оцінювання раціональності одержання цієї ознаки, яке можливо провести на підставі розглянутої моделі, поставивши у відповідність кожній ознаці, що бере участь у розпізнаванні, певний коефіцієнт, який відображає витрати на її одержання. У цьому разі процес розпізнавання можна оптимізувати з погляду обчислювальних витрат [5, 7].

У табл. 1 наведено результати розрахунків ентропії та вагових коефіцієнтів, знайдених для відповідних статистичних імовірностей правильного розпізнавання типу об'єкта розвідки ($N = 10, K = 500, M = 1$).

Таблиця 1

Зведена таблиця результатів розрахунків вагових коефіцієнтів

Назва	Значення									
P_n^1	0,913	0,8	0,75	0,7	0,6	0,65	0,62	0,4	0,5	0,45
E_n^1	0,083	0,178	0,215	0,249	0,306	0,280	0,296	0,366	0,346	0,359
c_n^1	0,268	0,124	0,103	0,089	0,072	0,079	0,075	0,06	0,064	0,062
Кількість правильних розпізнавань без урахування інформативності (С)										222 (44,4%)
Кількість правильних розпізнавань з урахуванням інформативності (c_n^1)										290 (58%)

Аналіз результатів показав, що застосування вагових коефіцієнтів, розрахованих на підставі ентропійного підходу, дозволило збільшити ймовірність правильного розпізнавання (у даній ситуації) на $\Delta = P'(10, 1, c_n^1, 0) - P(10, 1, c, 0) = 13,6\%$.

На рис. 2. показана діаграма зміни співвідношень імовірностей розпізнавання залежно від кількості ознак розпізнавання, що використовуються, і застосування вагових коефіцієнтів, розрахованих на підставі ентропійного підходу.

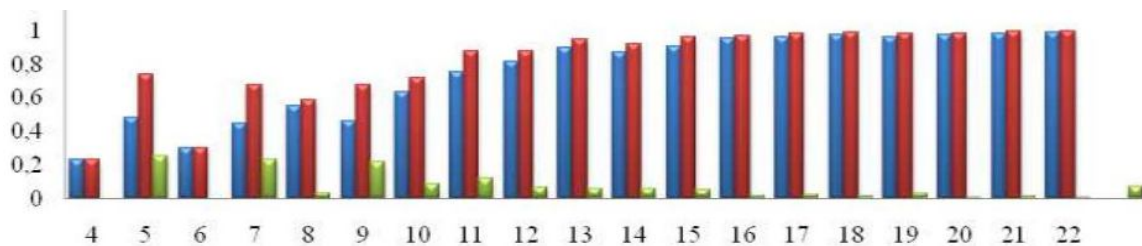


Рис. 2. Діаграма зміни відношень імовірностей розпізнавання

Аналіз наведених даних показує, що застосування вагових коефіцієнтів і розширення ознакового простору зумовлює збільшення ймовірності правильного розпізнавання. Середнє значення Δ становить близько 6%. Розрахунки проводилися для таких вихідних даних: $n = 4 \dots 22$, $K = 1000$, $M = 1$.

Висновки. Розроблено математичну модель функціонування підсистеми розпізнавання системи розвідки, яка дозволяє:

- розрахувати ймовірності розпізнавання даної підсистеми;
- визначити ефективність підсистеми розпізнавання;
- встановити раціональний набір ознак, що забезпечують необхідне значення ймовірностей за мінімальних значень наявних ресурсів;
- з'ясувати ступінь впливу на процес розпізнавання вагових коефіцієнтів, розрахованих на підставі ентропійного підходу;
- дослідити ступінь впливу помилок на ймовірність розпізнавання об'єктів розвідки.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Аксенов Г. Н., Рубцов В. С., Радковец Ю. И. Оперативно-информационная подготовка: Информационное моделирование системы радио- и радиотехнической разведки фронта : учеб. пособ. Киев : КВИРТУ ПВО, 1987. 72 с.
2. Гаценко С. С. Методика раціонального розподілу розвідувальної інформації за важливістю та кількістю розвідувальних ознак в умовах невизначеності // Зб. наук. праць НДІ ГУР Міністерства оборони України. 2017. № 43. С. 111–120.
3. Шуренок В. А. Методика оцінки космічної обстановки на базі нечіткої логіки // Зб. наук. праць Військ. ін-ту Київськ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Київ : ВІКНУ, 2003. Спецвип. С. 191–203.
4. Гребенюк О. П., Роговець М. А., Шуренок В. А. Застосування системно-когнітивного аналізу для автоматизації управління системою радіомоніторингу // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. 2010. № 1 (52). С. 72–80.
5. Method of integral estimation of channel state in the multiantenna radio communication systems / S. Kalantaievskia, H. Pievtsov, A. Kuvshynov et al. // Eastern-european journal of enterprise technologies. Information and controlling system. 2018. Vol. 5, No 9 (95). P. 60–76.
6. Method of Immunity Minimization of the Free Platform ed Inertial Navigation System of Unmanned Aircrafts / R. Bieliakov, S. Hatsenko, O. Fesenko et al. // 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2–6, 2019. P. 803–808.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 7-е изд. Москва : Высшая школа, 2001. 575 с.

8. Ту Джулиус, Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. И. Б. Гуревича; под общ. ред. Ю. И. Журавлева. Москва : Мир, 1978. 411 с.
9. Журавлёв Ю. Л. Распознавание, классификация, прогноз. Математические методы и их применение. Москва : Наука, 1992. 320 с.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2021.

REFERENCES

1. Aksenov, G. N., Rubtsov, V. S., & Radkovets, Iu. I. (1987). *Operativno-informatsionnaia podgotovka: Informatsionnoe modelirovanie sistemy radio- i radiotekhnicheskoi razvedki fronta : ucheb. posob. [Operational and information training: Information modeling of the system of radio and electronic intelligence of the front]*. Kyiv [in Russian].
2. Hatsenko, S. S. (2017). Metodyka ratsionalnoho rozpodilu rozviduvalnoi informatsii za vazhlyvisti ta kilkistiu rozviduvalnykh oznak v umovakh nevyznachenosti [Methods of rational distribution of intelligence information on the importance and number of intelligence features in conditions of uncertainty]. *Zb. nauk. prats NDI HUR Ministerstva oborony Ukrainy [Collection of scientific works of the Research Institute of the Defense Intelligence Ministry of Defense of Ukraine]*, 43, 111–120 [in Ukrainian].
3. Shurenok, V. A. (2003). Metodyka otsinky kosmichnoi obstanovky na bazi nechitkoi lohiky [Methods of estimating the space situation on the basis of fuzzy logic]. *Zb. nauk. prats Viisk. in-tu Kyivsk. nats. un-tu im. Tarasa Shevchenka [Collection of scientific works of Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv]*, Special issue, 191–203. Kyiv [in Ukrainian].
4. Hrebenuk, O. P., Rohovets, M. A., & Shurenok, V. A. (2010). Zastosuvannia systemno-kohnityvnoho analizu dlia avtomatyzatsii upravlinnia systemoiu radiomonitorynhu [Application of system-cognitive analysis for automation of radio monitoring system management]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky [Collection of ZhSTU. Technical sciences]*, 1 (52), 72–80 [in Ukrainian].
5. Kalantaievska, S., Pievtsov, H., Kuvshynov, A., Hatsenko, S., Shyshatskyi, A., & Yarosh, S. et al. (2018). Method of integral estimation of channel state in the multiantenna radio communication systems. *Eastern-european journal of enterprise technologies. Information and controlling system*, Vol. 5, № 9 (95), 60–76.
6. Bieliakov, R., Hatsenko, S., Fesenko, O., Zhyvotovskiy, R., & Petruk, S. (2019). Method of Immunity Minimization of the Free Platform ed Inertial Navigation System of Unmanned Aircrafts. In *2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*. Lviv, July 2–6, 2019. (pp. 803–808).
7. Venttsel', E. S. (2001). *Teoriia veroiatnostei [Probability theory]*. 7th ed. Moscow [in Russian].
8. Tu Dzhulius, & Gonsales, R. (1978). *Printsipy raspoznaniia obrazov [Principles of Pattern Recognition]*. (I. B. Gurevich, Trans), Iu. I. Zhuravlev (Eds). Moscow [in Russian].
9. Zhuravlev, Iu. L. (1992). *Raspoznvanie, klassifikatsiia, prognoz. Matematicheskie metody i ikh primeneniie [Recognition, classification, forecast. Mathematical methods and their application]*. Moscow [in Russian].

S. S. Hatsenko, A. V. Muraviyov, R. M. Mamaisur, S. V. Mostovii, D. V. Piatak

MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING INTELLIGENCE SYSTEM RECOGNITION SUBSYSTEMS

The intelligence system is a multilevel recognition system. One of the top priorities of the intelligence system for intelligence objects is the task of recognizing them. For example, in an electronic reconnaissance system, the type of radio and radar station is a sign of determining the operational and tactical affiliation of a radio network or radio system, while determining the type of radio and radio station is one of the tasks of recognition.

The recognition process is defined as one of the types of classification. The principle of recognition as a process of information processing is the division of information into a posteriori and a priori. Recognition is the process of comparing the obtained intelligence data on a certain intelligence object (a posteriori information) with the data, which consists in the description of all intelligence objects (a priori information) with the help of intelligence features, to determine the affiliation of the intelligence object. A posteriori data on the object of reconnaissance is compared with a priori information using recognition algorithms.

Recognition is used to establish the operational and tactical affiliation of individual electronic means, networks, communication nodes, command posts, as well as to take into account the impact of enemy resistance. Some processes can be both processing tasks, such as systematization of information, data, features.

At the moment, in a number of works, attempts are being made to expand the feature space and improve the scientific and methodological apparatus of recognition. These works are aimed at improving system performance, in particular - the probability of correct recognition. In order to determine how much this value has changed, depending on various factors, methods of mathematical modeling of the system, as well as laboratory and field experiments are used. The use of the latter is associated with certain difficulties, especially when it comes to a complex dynamic system of intelligence on the activities of foreign states in space, the means of measurement of which have a wide geography of location and differ in various features of operation. To assess the main indicators of the recognition system and ensure the possibility of optimal choice of means of measuring the parameters of the reconnaissance objects, it is proposed to develop a model of system operation.

A mathematical model of the functioning of the recognition system is proposed. Application of the considered model will allow to solve the problems connected with construction of systems of recognition and definition of necessary quantity of signs.

Keywords: *system; model; recognition; features; object of exploration; entropy.*

Авсієвич Роман Олексійович – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- телекомунікації;
- космічні системи.

Бугайов Микола Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- математичні методи й алгоритми оброблення сигналів.

Гаврилюк Олексій Сергійович – науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- радіотехнічні системи спеціального призначення.

Гаєвський Олег Васильович – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;
- підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Гаценко Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, заступник начальника кафедри Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;
- підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Гребенюк Олег Олегович – ад'юнкт науково-організаційного відділення Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- системи радіомоніторингу.

Гребенюк Олег Петрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- системи радіомоніторингу.

Клязника Володимир Вікторович – заступник начальника кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- комплекси та засоби радіоелектронної розвідки.

Костінський Сергій Вікторович – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;
- підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Лагодний Олександр Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- інформаційна безпека держави;
- технічний захист інформації.

Мамайсур Роман Михайлович – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;
- підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Мордас Ігор Петрович – помічник коменданта із режиму секретності – начальник режимно-секретного відділення Окремої комендатури охорони і забезпечення Державної прикордонної служби України.

Наукові інтереси:

- інформаційна безпека держави.

Муравйов Андрій Володимирович – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;
- підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Нагорнюк Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу наукового центру Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- автоматизація процесів визначення виду та параметрів сигналів;
- удосконалення методів радіопеленгування.

Павленко Віктор Олександрович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- протидія технічним розвідкам;
- технічний захист інформації.

Пазич Іван Володимирович – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

- інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;
- підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Рикун Віталій Леонідович – викладач кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

- радіоелектронні системи.

Роговець Максим Анатолійович – кандидат технічних наук, начальник кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– системи радіомоніторингу.

Сапозников Костянтин Миколайович – слухач Командно-штабного інституту застосування військ (сил) Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського.

Наукові інтереси:

– інформаційні технології у сфері безпеки та оборони;

– підвищення ефективності ведення воєнної розвідки.

Фриз Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова.

Наукові інтереси:

– проблеми планування в космічних системах;

– оптимізаційні моделі процесів у технічних системах.