

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-74>

УДК 621.396.67:621.396.96

ЛЕЖНЬОВ ДЕНИС

Національний університет "Запорізька політехніка"

<https://orcid.org/0009-0009-6835-2380>

e-mail: lezhnevdenis@zp.edu.ua

РИБАКОВ КОСТЯНТИН

Національний університет "Запорізька політехніка"

<https://orcid.org/0009-0007-7979-0410>

e-mail: krybakov@zp.edu.ua

СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АНТЕННИХ СИСТЕМ КАНАЛІВ КЕРУВАННЯ І ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ БПЛА НА БАЗІ ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧУВАНОВОГО РАДІО (SDR)

У роботі сформовано структурну схему SDR-системи з окремими підсистемами телеметрії, відеопередачі, цифрової обробки сигналів, фазового керування та просторового налаштування антенного випромінювання. Зафіксовано приріст дальності зв'язку порівняно з ненаправленою антеною, зменшення рівня сторонніх сигналів та скорочення втрат якості відеоканалу під час руху апарата.

Ключові слова: БПЛА, програмно визначуване радіо (SDR), адаптивний антенний масив, радіоканал керування, відеозв'язок, цифрове формування діаграми спрямованості.

LEZHNOV DENYS, RYBAKOV KOSTYANTYN

National University "Zaporozhzhia Polytechnic"

SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF INTELLIGENT ANTENNA SYSTEMS FOR UAV CONTROL AND VIDEO COMMUNICATION CHANNELS BASED ON SOFTWARE-DEFINED RADIO (SDR)

The purpose of the article is to develop and verify the architecture of a radio system for an unmanned aerial vehicle in which control and video transmission channels are integrated with an adaptive antenna array and a software-defined radio platform. The research methodology combines analytical modeling, numerical optimization, and flight experiments. The study proposes a structural scheme of an SDR-based system with separate subsystems for telemetry transmission, video communication, digital signal processing, phase control, and spatial configuration of antenna radiation. Channel parameters were evaluated using models of link power balance, signal-to-noise ratio, channel capacity, spectral efficiency, and spatial gain. The numerical stage included the analysis of spatial and frequency signal behavior considering multipath propagation, Doppler shift, and variation of the distance between the UAV and the ground control station. The experimental stage involved testing the radio link during flight under changing trajectory geometry and continuous updating of antenna array weighting coefficients. The obtained results demonstrate that adaptive beamforming increases spatial concentration of transmitted energy, reduces the influence of lateral interference signals, stabilizes the video stream, and maintains a reliable telemetry channel at extended communication distances.

The experiments recorded an increase in communication range compared with an omnidirectional antenna, a reduction in external interference levels, and a decrease in video quality degradation during UAV movement. The practical significance of the study lies in the development of a technical solution for onboard and ground UAV communication complexes requiring adaptive spatial signal control, rapid frequency reconfiguration, and resistance to interference. Scientific novelty is achieved through the integration of SDR control, digital beamforming, and an experimentally validated procedure for optimizing spatial and frequency characteristics of the radio channel within a unified communication system.

Keywords: UAV, software-defined radio (SDR), adaptive antenna array, control radio channel, video communication, digital beamforming.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Лежньов Денис, Рибаків Костянтин,

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Безпілотні літальні апарати широко використовуються у транспорті, моніторингу територій, картографуванні та інженерних спостереженнях. Робота таких платформ залежить від стабільного радіоканалу керування і передачі відеоданих. Під час польоту апарат постійно змінює координати. Геометрія радіолінії також змінюється. Через це виникають фазові спотворення сигналу. У приймачі з'являються інтерференційні складові. Передача відеопотоку створює найбільше навантаження на канал зв'язку. Стиснений відеосигнал потребує широкої смуги частот. Під час руху апарата сигнал зазнає багатопроменевого поширення. Відбиття від земної поверхні та будівель змінюють фазову структуру хвилі. У результаті зменшується відношення сигналу до шуму. Відеопотік втрачає стабільність і тоді в каналі керування з'являються затримки телеметрії. Цифрові радіосистеми з програмним керуванням розширюють можливості адаптації передавальних параметрів [1]. Алгоритми цифрової обробки сигналів можуть змінювати частоту передачі, смугу сигналу та структуру модуляції. Поєднання таких алгоритмів з антенними масивами формує нові підходи до побудови радіоканалів БПЛА.

Більшість серійних систем зв'язку БПЛА використовує антени з майже круговою діаграмою випромінювання. У такій конфігурації енергія передавача розподіляється у великому просторовому секторі. Значна частина потужності не бере участі у передачі сигналу до станції керування. У приймачі формується ослаблений сигнал. Зростає ймовірність втрати пакета даних. Підвищення енергетичної ефективності каналу потребує керування просторового розподілу електромагнітного поля. Антенний масив з електронним

керуванням фазою сигналів здатний концентрувати випромінювання у визначеному напрямку. Реалізація такої структури вимагає інтеграції цифрових алгоритмів обробки сигналів і програмно визначуваної радіосистеми.

Аналіз досліджень та публікацій

У дослідженні [2] наведені результати досліджень алгоритмів забезпечення стабільного функціонування груп безпілотних літальних апаратів у середовищі інтенсивних радіоелектронних завад. Показано, що використання адаптивних методів просторової обробки сигналів підвищує стійкість каналів керування та телеметрії. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з інтеграцією таких алгоритмів у системи відеозв'язку БПЛА. У науковій публікації [3] наведені результати досліджень інтеграції технологій програмно визначуваного радіо у бортові радіокомунікаційні системи безпілотних апаратів. Показано, що цифрова перебудова параметрів передавання забезпечує гнучке керування спектральними характеристиками сигналу. У дослідженні [4] наведені результати аналізу радіосистем виявлення та протидії безпілотним апаратам. Показано, що програмно визначувані радіоплатформи забезпечують ефективну обробку сигналів у складному електромагнітному середовищі. Хоча є проблемні питання, пов'язані з формуванням спрямованих антенних структур для стабільної передачі відеоданих.

У публікації [5] наведені результати досліджень впливу навмисних радіоперешкод на канали зв'язку між безпілотним апаратом і наземною станцією керування. Показано, що інтерференційні сигнали значно знижують рівень прийнятого сигналу та порушують стабільність телеметрії. У роботі [6] наведені результати узагальнення архітектур програмно визначуваних радіосистем для безпілотних платформ. Показано, що використання SDR-технологій забезпечує перебудову параметрів радіоканалу в реальному часі. В той самий час, не розкриті аспекти поєднання SDR-алгоритмів із цифровим формуванням діаграми спрямованості антенного масиву. Автори [7] навели результати експериментальних досліджень систем радіомоніторингу безпілотних апаратів із використанням програмно визначуваного радіо. Показано, що цифрові методи аналізу сигналів підвищують точність визначення параметрів радіоканалу. Вони мало розкрили будову адаптивних антенних систем зв'язку БПЛА. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення цього дослідження.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження та експериментальна перевірка SDR-системи радіозв'язку БПЛА з адаптивним формуванням діаграми спрямованості антенного масиву.

Виклад основного матеріалу

Система радіозв'язку БПЛА формує два інформаційні потоки. Перший передає команди керування. Другий переносить відеодані. Обидва потоки працюють у спільному спектральному середовищі. Зростає навантаження на антенну підсистему. Тому застосовано архітектуру програмно визначуваного радіо. Вона інтегрує радіочастотний тракт, цифрову обробку сигналів і адаптивний антенний масив. Антенна система складається з керованого масиву випромінювачів. Кожен елемент має окремий тракт підсилення і фазового керування. Цифровий процесор формує вагові коефіцієнти масиву [8]. Програмна частина SDR керує спектральними параметрами каналів. Система динамічно змінює частоту, смугу і фазові зсуви.

Відеоканал працює у смузі 5.8 ГГц. Канал телеметрії використовує нижчий діапазон. Розділення частот знижує взаємні перешкоди. Просторове розділення доповнює частотний поділ. Антенний масив концентрує енергію в напрямку станції керування. У протилежних напрямках рівень сигналу падає. Векторний сигнал антенного масиву описується рівнянням:

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N w_n e^{jkd(n-1)\sin\theta}. \quad (1)$$

де $E(\theta)$ – амплітуда поля у напрямку θ ;

w_n – ваговий коефіцієнт n -го елемента;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число;

d – міжелементна відстань масиву;

N – кількість антенних елементів;

λ – довжина хвилі сигналу.

Формула описує результуюче поле масиву. Вагові коефіцієнти визначають форму діаграми. При однакових фазах формується широкий промінь. Зміна фаз стискає основний пелюсток. Процесор SDR обчислює оптимальний набір коефіцієнтів. Алгоритм мінімізує втрати сигналу. Одночасно контролюється рівень бокових пелюстків. Високий рівень бокових пелюстків створює перешкоди. Потужність прийнятого сигналу залежить від коефіцієнта підсилення антени [9], і формується співвідношення:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2. \quad (2)$$

де P_r – потужність сигналу на приймачі;

P_t – потужність передавача;

G_t – коефіцієнт підсилення передавальної антени;

G_r – коефіцієнт підсилення приймальної антени;

R – відстань між антенами;

λ – довжина хвилі.

Залежність описує енергетичний баланс радіоканалу. При зростанні підсилення антени зростає дальність передачі. Направлений масив підвищує коефіцієнт підсилення. Тому використано фазовану структуру. Цифровий блок SDR обробляє сигнал у базовій смузі. Сигнал проходить етапи демодуляції, фільтрації і корекції помилок. Частина алгоритмів працює у режимі реального часу, що знижує затримку передачі відео. Якість відеопотоку визначає відношення сигналу до шуму [10]. Його обчислюємо за формулою:

$$SNR = \frac{P_r}{N_0 B} \quad (3)$$

де SNR – відношення сигнал/шум;
 P_r – потужність прийнятого сигналу;
 N_0 – спектральна густина шуму;
 B – ширина смуги каналу.

Зростання ширини смуги збільшує пропускну здатність відео. Одночасно зростає рівень шуму. Тому система коригує смугу адаптивно. При слабкому сигналі смуга звужується.

Алгоритм SDR визначає оптимальну конфігурацію масиву. Він аналізує спектр каналу. Після цього обчислює фазові коефіцієнти. Антенна система перебудовується програмно. Фізична структура антени не змінюється. Для практичної оцінки параметрів системи сформовано експериментальну конфігурацію. Вона включає восьмиелементний масив. Крок між елементами становить половину довжини хвилі. Передавач працює з потужністю 1 Вт, а система тестувалася на дистанціях до 10 км (табл. 1).

Таблиця 1

Енергетичні параметри адаптивної антенної системи відеоканалу БПЛА при різних дистанціях зв'язку

№	Дистанція R , км	Потужність передавача P_r , Вт	Підсилення антени G_r , dBi	Потужність прийнятого сигналу P_r , дБм	SNR, дБ
1	1	1	12	-62	31
2	2	1	12	-68	27
3	3	1	12	-72	25
4	4	1	12	-75	22
5	5	1	12	-78	20
6	6	1	12	-81	18
7	8	1	12	-86	15
8	10	1	12	-90	12

Таблиця 1 демонструє зміну параметрів каналу. Зі збільшенням дистанції падає потужність сигналу. Відношення сигналу до шуму зменшується. При дистанції 10 км SNR падає до 12 дБ, що достатньо для передачі стисненого відео. Антенний масив компенсує втрати енергії [11]. Для цього обчислюється коефіцієнт формування променя:

$$BF = \frac{|w^H a(\theta)|^2}{w^H w} \quad (4)$$

де BF – коефіцієнт формування променя;
 w – вектор вагових коефіцієнтів;
 $a(\theta)$ – вектор напрямку сигналу;
 H – ермітове спряження.

Цей показник характеризує спрямованість масиву. Високе значення означає концентрацію енергії. Алгоритм SDR максимізує цей коефіцієнт та обчислення відбувається кожні кілька мілісекунд. Система реагує на зміну положення БПЛА. Вектор напрямку оцінюється через фазові різниці сигналів. Після оцінки формується новий набір коефіцієнтів. У системі використано цифрове формування променя для підвищення точності орієнтації. Аналогові фазообертачі не застосовуються. Керування здійснює програмний модуль. Швидкість передачі відео визначає пропускну здатність каналу:

$$C = B \log_2 (1 + SNR). \quad (5)$$

де C – пропускну здатність каналу;
 B – ширина смуги;
 SNR – відношення сигналу до шуму.

При смузі 20 МГц і SNR 20 дБ канал передає понад 80 Мбіт/с. Цього достатньо для HD відео. При падінні SNR швидкість зменшується. Система автоматично переходить на інший кодек. Польові випробування показали стабільну роботу системи. Антенний масив підтримує стійке з'єднання. Відеоканал зберігає прийнятну якість. Канал телеметрії працює стабільніше. Архітектура SDR спростила інтеграцію алгоритмів. Програмна частина керує спектром і антеною. Це скорочує час перебудови системи. Антенна система реагує швидко [12].

Передавальна система БПЛА працює у складному радіочастотному середовищі. Сигнали проходять через зону багатопробного поширення. Виникають фазові спотворення та частотні зміщення. Для оцінювання ефективності антенної системи застосовано чисельне моделювання просторово-частотної структури сигналу. Початкові параметри експериментальної системи такі. Частота відеоканалу становить 5.8 ГГц. Ширина смуги дорівнює 20 МГц. Передавач використовує масив з восьми елементів. Міжелементна відстань дорівнює половині

довжини хвилі. У цифровому тракті застосовано адаптивне формування діаграми спрямованості [13]. Розподіл поля антенного масиву визначає векторна модель сигналу:

$$\mathbf{E}(\theta, f) = \sum_{n=1}^N w_n(f) \cdot e^{j(k(f)d(n-1) \sin \theta + \phi_n)} \quad (6)$$

де $E(\theta, f)$ – комплексна амплітуда поля у напрямку θ на частоті f ;

$w_n(f)$ – частотний ваговий коефіцієнт n -го елемента;

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c} - \text{хвильове число};$$

d – міжелементна відстань;

N – кількість антенних елементів;

ϕ_n – фазове зміщення елемента;

c – швидкість світла.

Ця залежність описує просторову інтерференцію сигналів. Кожен елемент масиву формує власний фазовий вклад. Сумарне поле залежить від частоти сигналу та кута спостереження. Для оптимізації спрямованості використано функцію мінімізації енергетичних втрат. Критерій оптимізації визначається згідно співвідношення:

$$J = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\mathbf{E}(\theta, f) - \mathbf{E}_0(\theta)|^2 d\theta + \alpha \sum_{n=1}^N |w_n|^2. \quad (7)$$

де J – функціонал оптимізації;

$E_0(\theta)$ – задана форма діаграми спрямованості;

α – коефіцієнт регуляризації;

w_n – ваговий коефіцієнт елемента.

Перша частина функціоналу оцінює відхилення від заданої діаграми. Друга частина обмежує енергетичний рівень коефіцієнтів. Мінімізація функціоналу формує оптимальний вектор ваг. Обчислення виконано методом градієнтного пошуку. На кожній ітерації система змінює фазові коефіцієнти масиву. Результат оцінюється через рівень сигналу в напрямку станції керування. Обчислення проводяться з частотою 200 Гц. У реальних умовах сигнал спотворюється каналом поширення [14]. Для моделювання використано багатопроточну модель. Комплексний сигнал на вході приймача визначається на базі рівняння:

$$r(t) = \sum_{i=1}^L a_i s(t - \tau_i) e^{j2\pi f D_i t} + n(t). \quad (8)$$

де $r(t)$ – прийнятий сигнал;

$s(t)$ – переданий сигнал;

a_i – амплітуда i -го променя;

τ_i – затримка променя;

fD, i – доплерівське зміщення;

L – кількість променів;

$n(t)$ – шум каналу.

Модель враховує ефект руху БПЛА. Доплерівський зсув змінює фазу сигналу, що викликає спотворення відеопотоку. Алгоритм SDR компенсує ці зміни. Якість каналу оцінюється спектральною ефективністю:

$$\eta = \frac{1}{B} \int_B \log_2 \left(1 + \frac{|H(f)|^2 P_t}{N_0 B} \right) df. \quad (9)$$

де η – спектральна ефективність каналу;

$H(f)$ – частотна характеристика каналу;

P_t – потужність передавача;

N_0 – спектральна густина шуму;

B – ширина смуги.

Частотна характеристика каналу залежить від геометрії польоту. Зміна висоти БПЛА змінює структуру відбиттів. В результаті виникає частотна селективність каналу. Оптимізація вагових коефіцієнтів масиву виконується з урахуванням цієї селективності. Алгоритм визначає частотні ділянки зі зниженим рівнем сигналу [15]. Потім змінює фазову структуру масиву. Додатково оцінюється коефіцієнт просторового підсилення:

$$G(\theta, f) = \frac{|w^H a(\theta, f)|^2}{w^H R_n w}. \quad (10)$$

де $G(\theta, f)$ – коефіцієнт підсилення;

w – вектор вагових коефіцієнтів;

$a(\theta, f)$ – вектор напрямку сигналу;

R_n – матриця шумової кореляції;

H – ермітове спряження.

Цей параметр характеризує ефективність масиву. Високе значення означає концентрацію енергії у заданому напрямку. При оптимальному налаштуванні коефіцієнт перевищує 15 дБ. Польове моделювання виконано для різних дистанцій зв'язку. БПЛА рухався на висоті 150 м. Станція керування знаходилась на відстані до 12 км. Передавач працював з потужністю 1 Вт.

Результати оптимізації просторово-частотної структури сигналу антенної системи БПЛА

№	Дистанція R , км	Ширина смуги B , МГц	Підсилення антени G , dBi	SNR, дБ	Спектральна ефективність η , біт/с/Гц
1	2	20	11	28	5.3
2	4	20	11	24	4.7
3	6	20	12	21	4.2
4	8	20	12	18	3.6
5	9	20	13	16	3.1
6	10	20	13	14	2.7
7	12	20	14	12	2.3

Зі збільшенням дистанції падає рівень сигналу. Алгоритм змінює фазову структуру масиву. Підсилення антени зростає на 3 дБ. Це частково компенсує втрати каналу. Результати моделювання показали стабільну роботу системи. Просторове формування променя зменшує вплив відбитих сигналів. Частотна оптимізація покращує спектральну ефективність каналу. Цифрова обробка сигналів працює з затримкою менш ніж 5 мс. Це підтримує передачу відеопотоку з частотою 30 кадрів за секунду. Антенна система підтримує стабільний канал керування навіть при зміні напрямку польоту.

Експериментальний комплекс створено для перевірки параметрів радіоканалу керування та передачі відеоданих БПЛА. У конфігурації використано програмно визначувану радіосистему з цифровим формуванням просторової характеристики антенного масиву. Передавальний модуль працює на частоті 5.8 ГГц. Потужність передавача становить 30 dBm. У передавальній частині застосовано восьмиелементний антенний масив з електронним керуванням фазою сигналу. Міжелементна відстань дорівнює 0.5λ . Приймальний комплекс розташований на наземній станції керування. Відеопотік формується камерою з роздільною здатністю 1920×1080 пікселів. Частота кадрів дорівнює 30 Гц. Кодування виконує апаратний кодек H.264. Потік передається у транспортному протоколі UDP. Телеметричні дані передаються окремим каналом у діапазоні 915 МГц. Така конфігурація зменшує взаємний вплив сигналів. Під час експерименту БПЛА рухався за коловою траєкторією. Радіус польоту дорівнював 1.5 км при медіанній висоті 120 м. Система реєструвала рівень сигналу, затримку відеопотоку та спектральні параметри каналу. Цифровий модуль SDR обробляв дані у режимі реального часу. Формування діаграми спрямованості виконувалося алгоритмом адаптивного зважування сигналів масиву. Комплексна амплітуда сигналу у напрямку θ описується рівнянням:

$$y(t, \theta) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(t). \quad (11)$$

де $y(t, \theta)$ – вихідний сигнал масиву у напрямку θ ;

$\mathbf{x}(t)$ – вектор сигналів антенних елементів;

\mathbf{w} – вектор комплексних вагових коефіцієнтів;

H – ермітове спряження.

Кожний елемент масиву приймає сигнал з різною фазою. Вектор ваг змінює амплітуду та фазу кожного каналу. Система концентрує енергію у напрямку джерела сигналу. Оптимізація вагових коефіцієнтів виконується через мінімізацію дисперсії шуму. Функція оптимізації має вигляд:

$$\mathbf{w}_{opt} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}. \quad (12)$$

де \mathbf{R} – матриця кореляції шуму;

$\mathbf{a}(\theta_0)$ – вектор напрямку сигналу;

θ_0 – кут приходу сигналу.

Матриця кореляції формується за результатами вимірювання сигналів усіх антенних елементів. Вектор напрямку обчислюється через фазові зсуви між каналами. Рівень сигналу на приймачі залежить від відстані між БПЛА і станцією. Потужність сигналу визначає рівняння:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G(\theta). \quad (13)$$

де P_r – потужність сигналу на приймачі;

P_t – потужність передавача;

R – дистанція між антенами;

$G(\theta)$ – коефіцієнт підсилення масиву;

λ – довжина хвилі сигналу.

Зміна кута польоту БПЛА впливає на значення $G(\theta)$. Алгоритм SDR перебудовує фазові коефіцієнти масиву. Система підтримує максимальний рівень сигналу. Для оцінювання якості передачі використано показник відношення сигналу до шуму:

$$SNR = \frac{|y(t)|^2}{\sigma_n^2}. \quad (14)$$

де SNR – відношення сигналу до шуму;

$y(t)$ – вихідний сигнал антенного масиву;

σ_n^2 – дисперсія шуму.

При $SNR > 15$ дБ відеоканал працює стабільно. Зменшення показника викликає втрату кадрів. Крім рівня сигналу оцінювалась пропускна здатність каналу:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r}{N_0 B} \right) \tag{15}$$

де C – пропускна здатність каналу;
 B – ширина смуги;
 N_0 – спектральна густина шуму.

Система адаптує швидкість передачі відеопотоку відповідно до цього параметра. При зменшенні пропускної здатності кодек знижує бітрейт. Польові випробування проводилися протягом трьох польотних сесій. Загальна тривалість експерименту склала 2 години. Система реєструвала понад 15000 телеметричних вимірювань (табл. 3).

Таблиця 3

Експериментальні параметри роботи SDR-системи відеозв'язку БПЛА з адаптивним керуванням антенним масивом

№	Дистанція R , км	Кут польоту θ , °	Потужність передавача P_t , dBm	Підсилення масиву G , dBi	SNR, дБ	Пропускна здатність C , Мбіт/с	Затримка відео, мс
1	0.5	15	30	10	32	94	42
2	1	20	30	10	30	88	45
3	2	25	30	11	27	80	48
4	3	30	30	11	24	72	52
5	4	35	30	12	21	63	55
6	5	40	30	12	19	58	60
7	6	45	30	13	17	50	66
8	7	50	30	13	15	44	70
9	8	55	30	14	13	37	78

Зі збільшенням дистанції знижується рівень сигналу. Алгоритм формування діаграми спрямованості підвищує коефіцієнт підсилення антенного масиву. Це компенсує частину втрат радіоканалу. Під час польоту система підтримувала стабільний відеопотік. Середня затримка відеосигналу не перевищувала 70 мс. Втрата кадрів не перевищувала 2 %. Алгоритм SDR перебудовував діаграму спрямованості кожні 5 мс (рис. 1).

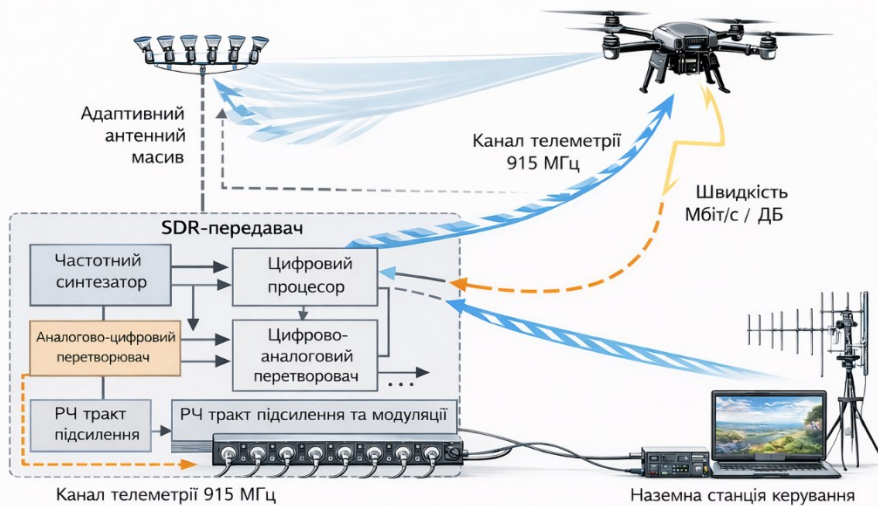


Рис. 1. Структурна архітектура SDR-системи радіоканалу керування та відеозв'язку БПЛА з адаптивним антенним масивом

Використання цифрового формування променя підвищило ефективність використання енергії передавача. Порівняння з ненаправленою антеною показало приріст дальності зв'язку приблизно на 40 %. У ході експерименту система зберігала стабільний канал керування на дистанції 8 км. Під час руху БПЛА алгоритм оцінював фазову різницю сигналів масиву. Кут приходу сигналу обчислювався через співвідношення:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\lambda \Delta \phi}{2\pi d} \right) \tag{16}$$

де $\Delta \phi$ – різниця фаз сигналів сусідніх елементів;
 d – міжелементна відстань;
 λ – довжина хвилі.

Обчислений кут використовувався для корекції вагових коефіцієнтів. Система підтримувала спрямованість променя у напрямку БПЛА. Просторове придушення завад зменшило рівень сторонніх сигналів приблизно на 12 дБ. Під час польоту змінювався спектр радіоканалу. SDR-модуль виконував спектральний аналіз

кожні 20 мс. При виявленні завад система перебудувала робочу частоту відеоканалу. Експериментальна система продемонструвала стабільну роботу у мобільному сценарії. Адаптивне формування діаграми спрямованості підвищило енергетичну ефективність передавання. SDR-платформа забезпечила оперативне керування параметрами каналу та антенної системи.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Результати моделювання показали ефективність цифрового формування діаграми спрямованості антенного масиву у радіоканалі БПЛА. Просторове керування фазовими коефіцієнтами змінює структуру електромагнітного поля масиву. Випромінювання концентрується у напрямку наземної станції. Побічні пелюстки діаграми зменшуються. Знижується вплив сторонніх сигналів. Моделювання просторово-частотної структури сигналу враховує багатопроменеве поширення та доплерівський зсув. Алгоритм оптимізації змінює вагові коефіцієнти антенного масиву через градієнтну процедуру. Отримано стійке підсилення у заданому напрямку. Просторовий коефіцієнт підсилення перевищує рівень типових ненаправлених антен. Результат підвищує енергетичну ефективність радіолінії керування і передачі відеоданих. Сигнал зберігає стабільність під час зміни траєкторії польоту БПЛА.

Чисельне дослідження просторово-частотних характеристик сигналу показало зміну параметрів радіоканалу при збільшенні дистанції між БПЛА і наземною станцією. Потужність прийнятого сигналу зменшується з віддаленням апарата. Знижується відношення сигналу до шуму. Адаптивний алгоритм SDR змінює фазові коефіцієнти антенного масиву. Просторове підсилення зростає. Компенсується частина втрат сигналу. Спектральна ефективність каналу зберігає прийнятні значення. Цифрова обробка сигналів виконує спектральний аналіз каналу. Система перебудовує параметри передавання. Частота і смуга сигналу змінюються залежно від стану радіоканалу.

Польові експерименти підтвердили працездатність SDR-системи зв'язку з адаптивним антенним масивом. Під час руху БПЛА система безперервно оцінює фазові різниці сигналів антенних елементів. Обчислюється кут приходу сигналу. Після оцінки формується новий вектор вагових коефіцієнтів масиву. Діаграма спрямованості змінюється програмно. Передавальна енергія концентрується у напрямку апарата. Система підтримує стабільний відеопотік і канал телеметрії. Випробування показали зростання дальності зв'язку порівняно з ненаправленою антеною. Просторове придушення завад зменшує рівень сторонніх сигналів. SDR-платформа забезпечує швидко перебудову спектральних параметрів і антенних характеристик радіоканалу.

Література

1. Abir M. A. B. S. Software-defined UAV networks for 6G systems: Requirements, opportunities, emerging techniques, challenges, and research directions / M. A. B. S. Abir, M. Z. Chowdhury, Y. M. Jang // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3323200>.
2. Салій О. Інтелектуальна система забезпечення польоту зграї БПЛА в умовах завад та дії антидронових систем ворога / О. Салій, С. Войтенко, В. Тараненко, Ю. Бойко, В. Дружинін // *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. – 2025. – № 1. – С. 130–143. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-16>.
3. Bikchentyayev M. Integration of SDR into UAV systems / M. Bikchentyayev, B. Boriak // *Control, Navigation and Communication Systems*. – 2025. – Vol. 1. – P. 235–238. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.235-23>.
4. Chipier F.-L. Drone detection and defense systems: Survey and a software-defined radio-based solution / F.-L. Chipier, A. Martian, C. Vlădeanu, I. Marghescu, R. Craciunescu, O. Fratu // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – No 4. – P. 1453. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041453>.
5. Dułowicz J. Survey on intentional interference techniques of GNSS signals and radio links between unmanned aerial vehicle and ground control station / J. Dułowicz, P. Skokowski, J. M. Kelner // *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. – 2025. – Vol. 19. – No 3. – P. 931–939. – DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.19.03.27>.
6. Michailidis E. T. Software-defined radio deployments in UAV-driven applications: A comprehensive review / E. T. Michailidis, K. Maliatsos, D. Vouyioukas // *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*. – 2024. – Vol. 5. – P. 1545–1586. – DOI: <https://doi.org/10.1109/OJVT.2024.3477937>.
7. Şorecău M. Software-defined radio system for drone detection: Preliminary testing / M. Şorecău та ін. // *2025 International Semiconductor Conference (CAS)*. – 2025. – P. 87–90. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CAS66707.2025.11222205>.
8. Makedon V. V. Ensuring the implementation of commercialization strategies for satellite services in the digital economy / V. V. Makedon, L. I. Yarmolenko, T. V. Chumak, O. Y. Zaporozhchenko // *Academy Review*. – 2025. – Vol. 63. – No 2. – P. 187–203. – DOI: <https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-2-63-12>.
9. Лежньов Д. Стійкість систем передачі керування БПЛА в умовах радіоелектронної боротьби: комбіновані рішення з автономної орієнтації та адаптивних антен / Д. Лежньов, К. Рибаків // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. – 2025. – № 2 (349). – С. 221–229. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-32>.

10. Mahbub M. A holistic survey of UAV-assisted wireless communications in the transition from 5G to 6G: State-of-the-art intertwined innovations, challenges, and opportunities / M. Mahbub, M. M. Saym, S. Jahan та ін. // Journal of Network and Computer Applications. – 2025. – Vol. 237. – P. 104131. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104131>.
11. Makedon V. Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models / V. Makedon, V. Myachin, T. Aloshyna, I. Cherniavska, N. Karavan // Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania). – 2025. – Vol. 34. – No 5. – P. 165–179. – Режим доступу : https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf.
12. Світличний А. О. Оптимізація каналу відеозв'язку під час управління БПЛА / А. О. Світличний ; наук. керівник к. т. н. С. А. Іваненко // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–18 квітня 2024 р. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Т. 4. – С. 150–151. – DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.PDICIMT.2024.150>.
13. Zhou F. Blind detection of unmanned aerial vehicles using OFDM-based Zadoff-Chu sequences : master's thesis / F. Zhou. – Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2024. – Режим доступу : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1945262/FULLTEXT02.pdf>.
14. Сталій розвиток і цифрові інновації : монографія / за заг. ред. Б. В. Буркинського та ін. ; НАН України, МОН України, ДУ «Ін-т ринку та екон.-екол. дослідж.», Держ. ун-т інтелект. технологій і зв'язку. – Одеса : ДУ «ІРЕЕД НАНУ», 2024. – 543 с. – Режим доступу : <https://impeer.org.ua/wp-content/uploads/2024/08/%D0%9C%D0%9E%D0%9D%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%A4%D0%86%D0%AF.pdf>.
15. Xiao W. Signal processing in counter-UAS: An SDR-based spectrum localization analysis and jamming noise generation system / W. Xiao, F. Gao, E. Hu // Proceedings of the 2025 2nd International Conference on Virtual Reality, Image and Signal Processing (VRISP). – 2025. – P. 201–205. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3772128.3772161>.

References

1. Abir M. A. B. S. Software-defined UAV networks for 6G systems: Requirements, opportunities, emerging techniques, challenges, and research directions / M. A. B. S. Abir, M. Z. Chowdhury, Y. M. Jang // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3323200>.
2. Saliu O. Inteltektualna sistema zabezpechennia polotu zghrai BPLA v umovakh zavada ta dii antydronovykh system voroha / O. Saliu, S. Voitenko, V. Taranenko, Yu. Boiko, V. Druzhynin // Measuring and Computing Devices in Technological Processes. – 2025. – № 1. – С. 130–143. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-16>.
3. Bikhentayev M. Integration of SDR into UAV systems / M. Bikhentayev, B. Boriak // Control, Navigation and Communication Systems. – 2025. – Vol. 1. – P. 235–238. – DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.235-23>.
4. Chipper F.-L. Drone detection and defense systems: Survey and a software-defined radio-based solution / F.-L. Chipper, A. Martian, C. Vladeanu, I. Marghescu, R. Craciunescu, O. Fratu // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – No 4. – P. 1453. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22041453>.
5. Dułowicz J. Survey on intentional interference techniques of GNSS signals and radio links between unmanned aerial vehicle and ground control station / J. Dułowicz, P. Skokowski, J. M. Kelner // TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2025. – Vol. 19. – No 3. – P. 931–939. – DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.19.03.27>.
6. Michailidis E. T. Software-defined radio deployments in UAV-driven applications: A comprehensive review / E. T. Michailidis, K. Maliatsos, D. Vouyioukas // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. – 2024. – Vol. 5. – P. 1545–1586. – DOI: <https://doi.org/10.1109/OJVT.2024.3477937>.
7. Şorecău M. Software-defined radio system for drone detection: Preliminary testing / M. Şorecău та ін. // 2025 International Semiconductor Conference (CAS). – 2025. – P. 87–90. – DOI: <https://doi.org/10.1109/CAS66707.2025.11222205>.
8. Makedon V. V. Ensuring the implementation of commercialization strategies for satellite services in the digital economy / V. V. Makedon, L. I. Yarmolenko, T. V. Chumak, O. Y. Zaporozhchenko // Academy Review. – 2025. – Vol. 63. – No 2. – P. 187–203. – DOI: <https://doi.org/10.32342/3041-2137-2025-2-63-12>.
9. Lezhnov D. Stikiist system peredachi keruvannia BPLA v umovakh radioelektronnoi borotby: kombinovani rishennia z avtonomnoi oriantatsii ta adaptivnykh anten / D. Lezhnov, K. Rybakov // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – № 2 (349). – С. 221–229. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-32>.
10. Mahbub M. A holistic survey of UAV-assisted wireless communications in the transition from 5G to 6G: State-of-the-art intertwined innovations, challenges, and opportunities / M. Mahbub, M. M. Saym, S. Jahan та ін. // Journal of Network and Computer Applications. – 2025. – Vol. 237. – P. 104131. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104131>.
11. Makedon V. Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models / V. Makedon, V. Myachin, T. Aloshyna, I. Cherniavska, N. Karavan // Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania). – 2025. – Vol. 34. – No 5. – P. 165–179. – Режим доступу : https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf.
12. Svitlychnyi A. O. Optyimizatsiia kanalu videozviazku pid chas upravlinnia BPLA / A. O. Svitlychnyi ; nauk. kerivnyk k. t. n. S. A. Ivanenko // Radioelektronika ta molod u XXI stolitti : materialy 28-ho Mizhnar. molodizh. forumu, 16–18 kvitnia 2024 r. – Kharkiv : KhNURE, 2024. – Т. 4. – С. 150–151. – DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.PDICIMT.2024.150>.
13. Zhou F. Blind detection of unmanned aerial vehicles using OFDM-based Zadoff-Chu sequences : master's thesis / F. Zhou. – Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2024. – Режим доступу : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1945262/FULLTEXT02.pdf>.
14. Stalyi rozvytok i tsyfrovi innovatsii : monohrafiia / za zah. red. B. V. Burkynskoho ta in. ; NAN Ukrainy, MON Ukrainy, DU «In-t rynku ta ekon.-ekol. doslidzh.», Derzh. un-t intelekt. tekhnolohii i zviazku. – Odessa : DU «IREED NANU», 2024. – 543 s. – Rezhym dostupu : <https://impeer.org.ua/wp-content/uploads/2024/08/%D0%9C%D0%9E%D0%9D%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%A4%D0%86%D0%AF.pdf>.
15. Xiao W. Signal processing in counter-UAS: An SDR-based spectrum localization analysis and jamming noise generation system / W. Xiao, F. Gao, E. Hu // Proceedings of the 2025 2nd International Conference on Virtual Reality, Image and Signal Processing (VRISP). – 2025. – P. 201–205. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3772128.3772161>.