

DOI 10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939

УДК 621.396

ОЛЕКСАНДР САЛІЙ,
ВЛАДИСЛАВ ГОЛЬ,
АНДРІЙ ДІВІЦЬКИЙ,
ОЛЕКСІЙ ХАХЛЮК

КОМПЛЕКСНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОЇ РАДІОЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ І УПРАВЛІННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ

Ефективність виконання польотної місії безпілотним літальним апаратом на задану відстань залежить від багатьох факторів. Однак одним із ключових факторів успішного виконання польотної місії є наявність якісного управління та контролю телеметрії безпілотним літальним апаратом, які в свою чергу визначаються безвідмовним радіозв'язком між наземною станцією управління та безпілотним літальним апаратом.

Сучасний етап використання безпілотних літальних апаратів характеризується застосуванням активних завад різного типу та призначення, ціллю яких є виведення із ладу каналів управління, каналів навігації, каналів телеметрії та каналів передачі даних безпілотних літальних апаратів FPV з метою перешкодити успішному виконанню польотної місії апарату.

Розглянуті концептуальні питання реалізації гарантовано завадозахищеної радіолінії передачі даних і управління безпілотним літальним апаратом в умовах активних загороджувальних завад при комплексуванні різних технологічних рішень. До таких рішень віднесені вибір та обґрунтування спеціального діапазону частот, використання структурних схемних рішень для завадозахисту радіолінії передачі даних і управління; застосування специфічної схеми організації зв'язку з безпілотним апаратом; використання для радіоканалу приймача-передавача та портативних та легких антен, що відповідають обґрунтованим технічним вимогам; реалізації можливості відслідковування в реальному часі завадової обстановки на борту безпілотного апарату та виявлення типу завад; забезпечення польоту в секторі без застосування антенного трекінгу.

Проведено обґрунтування вимог та запропоновані варіанти вибору приймача-передавача і антени. Розроблені структурна схема радіолінії та запропоновані варіанти її застосування в якості радіолінії передачі даних і управління безпілотного апарату.

Наведені приклади відслідковування в реальному часі завадової обстановки на борту безпілотного апарату та виявлення типу завад. Проведений розрахунок та обґрунтований варіант польоту в секторі без застосування антенного трекінгу. Виконаний розрахунок орієнтовних значень сигналу на вході приймача безпілотного апарату.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, канал управління, завадозахищеність, режим FPV, активні загороджувальні завади, приймач-передавач, вузькоспрямована діаграма направленості антени, розрахунок параметрів радіолінії, аналіз завадової обстановки в реальному часі.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. На сучасному етапі розвитку засобів радіоелектронного подавлення (РЕП) завадова обстановка у зоні застосування безпілотних апаратів (ЗЗБА) визначається застосуванням наступних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ):

– “постановників” завад, які діють в межах частотного діапазону 0,1–6,0 ГГц (інша назва – “окопний РЕБ”);

- активних радіолокаційних станцій (РЛС), які діють в різних ділянках частотного діапазону 1–18 ГГц;
- формувачів загороджувальних спрямованих широкосмугових завад, діапазон випромінювання яких визначається роботою комплексів радіотехнічної розвідки з достатньою чутливістю аналізатора спектра частот, що контролюють радіочастотний спектр в смузі частот від 0,1–20 ГГц.

Таким чином, у ЗЗБА можуть створюватися завади із полем дії у вигляді напівкулі з радіусом до 5 км, які блокують канали управління з передачею команд та канали управління від першої особи – First Person View (FPV) в означеному вище спектрі частот. При цьому виключається можливість ефективного застосування будь-яких безпілотних апаратів у тому числі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), канал управління якими потрапляє в даних діапазон частот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних РЕЗ в аспекті постановки активних завад, проведений на основі відкритих відомостей із пошукових сайтів мережі Інтернет [1]-[8]. Результати аналізу зведені у табл. 1.

В [9] обґрунтовані основні принципи технологічної організації каналів управління між наземною станцією управління та БПЛА з урахуванням режиму FPV. Але в роботах [9], [10] не враховують особливостей застосування активних загороджувальних завад, їх вплив на канали управління БПЛА та захист від них, які на даних час широко діють в діапазоні частот 0,3...18 ГГц.

Постановка задачі. Потребує розробки комплекс технологічних заходів для гарантованого захисту каналів управління та передачі даних (FPV-відео) для успішного виконання функцій безпілотними апаратами.

Основний акцент технологічних рішень – гарантоване забезпечення візуального контролю території в нічний час в заданому секторі в умовах застосування активних завад в діапазоні частот 0,1–18 ГГц.

Пропонується рішення у вигляді комплексу інноваційних заходів для забезпечення завадозахищеної радіолінії передачі даних і управління між наземною станцією управління та БПЛА при здійсненні візуального управління (в режимі FPV). Комплексне одночасне застосування окремих заходів дає нову якість: суттєво підвищується завадозахищеність радіолінії передачі даних і управління БПЛА під час виконання польотної місії [11].

Основні технологічні рішення для виконання поставленої задачі. Для реалізації поставленої задачі застосовується комплексування технологічних рішень, які в результаті забезпечують нову якість в аспекті захисту від засобів РЕП, а саме:

- вибір та обґрунтування спеціального діапазону частот, інертного до можливих активних завад;
- розробка структурної схеми завадозахищеної радіолінії передачі даних і управління БПЛА;
- розробка узагальненої схеми організації зв'язку по радіолінії передачі даних і управління БПЛА;
- вибір приймача-передавача на основі обґрунтованих технічних вимог;
- обґрунтування та вибір портативних та легких антен з вузькоспрямованою діаграмою направленості (ДНА);
- відслідковування в реальному часі завадової обстановки на борту БПЛА та виявлення типу завад;
- забезпечення польоту в секторі без застосування антенного трекінгу.

Вибір та обґрунтування спеціального діапазону частот, інертного до можливих активних завад. Для реалізації вищезазначених функцій пропонується використати частотний план радіолінії передачі даних і управління згідно табл. 2.

Вибраний діапазон частот 24,25–29,5 ГГц гарантовано забезпечує захист радіолінії передачі даних і управління від існуючих засобів РЕП [12].

Таблиця 1 – Можливості сучасних РЕЗ для постановки активних завад

№ з/п	Тип обладнання	Призначення	Вплив на БПЛА
1.	Тактичний зенітний ракетний комплекс	Виявляти БПЛА за допомогою РЛС, яка обертається на 360°	Вражає БПЛА, має “мертву зону” – 0°...10° по куту місця
2.	Комплекс РЕБ	Постановник завад для БПЛА комерційного типу, в діапазоні 0,025–2,485 ГГц	Придушення каналів управління БПЛА та каналів FPV
3.	Станція перешкод верхнього діапазону	Постановник завад в діапазоні частот 8,0–20 ГГц	Придушення каналів зв'язку та передачі даних
4.	Станція перешкод нижнього діапазону	Постановник завад в діапазоні частот 2,9–3,2 ГГц	Придушення каналів зв'язку та передачі даних
5.	Комплекс радіотехнічної розвідки	Виявлення літаків та крилатих ракет з відстані понад 400 км в діапазонах 0,2–2,0 ГГц; 2,86–3,54 ГГц; 8,0–17,5 ГГц	Виявлення БПЛА на основі радіотехнічної розвідки
6.	Радіолокаційна станція (РЛС)	Локація в смузі частот 9,2–9,5 ГГц	Виявлення літальних апаратів
7.	Система РЕБ	– пеленгація в діапазоні 0,001– 18 ГГц; – подавлення в діапазоні 30–2700 МГц	Придушення каналів зв'язку та передачі даних
8.	Автоматизований наземний комплекс перешкод	Придушення ультра короткохвильового (УКХ), стільникового, транкінгового і супутникового зв'язку з частотами від 100 до 2000 МГц	Радіорозвідка і радіоелектронне придушення засобів рухомого зв'язку
9.	Комплекс радіорозвідки на придушення	Діапазон роботи 25–2500 МГц	Постановка завад засобам УКХ радіозв'язку, в тому числі і БПЛА
10.	Комплекс радіорозвідки та пеленгування	Діапазон роботи 0,001–18 ГГц	Виявлення місця розташування радіопередавачів
11.	Портативні засоби, які працюють від акумуляторної батареї	Постановник загороджувальних завад на фіксованих частотах роботи БПЛА; діапазон можливих частот 0,3–5,9 ГГц; радіус подавлення БПЛА – до 2000 м	Придушення каналів зв'язку та передачі даних БПЛА
12.	Комплекси портативних засобів РЕБ	З діапазоном завад 0,3–6 ГГц	Виявлення та знешкодження дронів, придушення каналів навігації БПЛА

Таблиця 2 – Частотний план радіолінії передачі даних і управління

Частотний діапазон	Смуга частот, ГГц	Ширина смуги частот Δf , ГГц	Швидкість передачі в дуплексі В, Мбіт/с	Гарантована дальність якісного зв'язку FPV, км
f26	24,25.....26,5	2,25	1,9	5,0 км
f28	27,5.....29,5	2,00	1,9	5,5 км

Розробка структурної схеми радіолінії передачі даних і управління БПЛА. Розроблена структурна схема радіолінії передачі даних і управління БПЛА представлена на рис. 1.

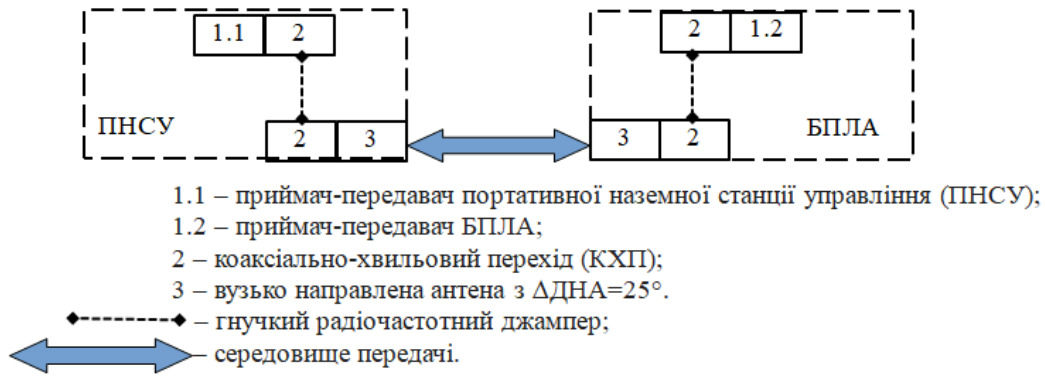
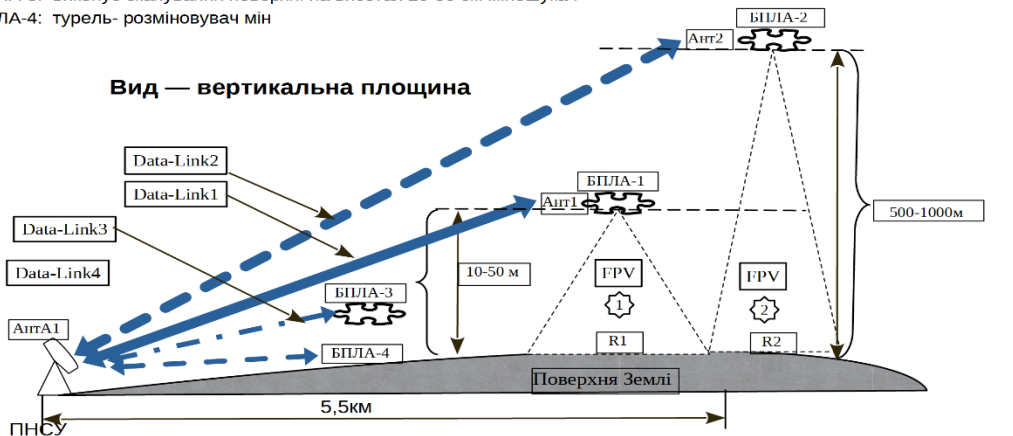


Рисунок 1 – Структурна схема радіолінії передачі даних і управління БПЛА

На стадії розробки структурної схеми зв'язку визначений склад комплектуючих для ПНСУ та БПЛА стосовно радіочастотної складової, наведений на рис. 1.

Розробка узагальненої схеми організації зв'язку по радіолінії передачі даних і управління БПЛА. Розроблена схема організації зв'язку представлена на рис. 2.

БПЛА-2: виконує контроль ситуативної обізнаності з висоти 500-1000м
 БПЛА-1: виконує обліт ЛЕП на висотах 10-25м
 БПЛА-3: виконує сканування поверхні на висотах 20-50 см міношукач
 БПЛА-4: турель- розмінювач мін



*Примітка — позначки та скорочення:

- ↔ - «Data-link2»; радіо-лінія передачі даних між ПНСУ та БПЛА-2; (діапазони частот: f26/f28; до 5,5 км; В=1,9/4/8/17 Мбіт/С; дуплекс)
- ↔ - «Data-link1»; радіо-лінія передачі даних між ПНСУ та БПЛА-1 (діапазони частот: f26/f28; до 5,5 км; В=1,9/4/8/17 Мбіт/С; дуплекс)
- ↔ - «Data-link3»; радіо-лінія передачі даних між ПНСУ та БПЛА-3 (діапазони частот: f26/f28; до 1.5 км; В=1,9/4/8/17 Мбіт/С; дуплекс)
- ↔ - «Data-link4»; радіо-лінія передачі даних між ПНСУ та БПЛА-4 (діапазони частот: f26/f28; до 1.2 км; В=1,9/4/8/17 Мбіт/С; дуплекс)
- ◆ - БПЛА-1/2/3; режим польоту, зависання, баражування, ніч;
 - БПЛА-4; режим турелі, ніч; розмінування
- ⊙ - сектор №1, в якому БПЛА-1 за допомогою режиму FPV обстежує ЛЕП;
- ⊙ - сектор №2, в якому БПЛА-2 за допомогою режиму FPV відслідковує ціль;
- R1 - радіус сектору 1, зона знаходження БПЛА-Б1, в якій забезпечується якісне зображення FPV ($\pm 20^\circ$); R1=290м; тобто основа сектору огляду $2 \times 290=580$
- R2 - радіус сектору 2, зона знаходження БПЛА-Б2, в якій забезпечується якісне зображення FPV ($\pm 20^\circ$); R4=290м; тобто основа сектору огляду $2 \times 290=580$
- АНТА1 - секторна антена ПНСУ з ДНА=25°;
- АНТ1 - секторна антена БПЛА-Б1 з ДНА=25°;
- АНТ2 - секторна антена БПЛА-Б2 з ДНА=25°.
- ПНСУ - Портативна (переносна) Наземна Станція Управління польотом БПЛА

Рисунок 2 – Узагальнена схема організації зв'язку по радіолінії передачі даних і управління БПЛА

Схема організації зв'язку відображає чотири режими застосування радіолінії передачі даних і управління в залежності від функціонального призначення, а саме:

1. Контроль проникнення зловмисних груп на підконтрольну територію в нічний час (застосування БПЛА-2, дронавого типу).
2. Обстеження магістральних високовольтних ліній електропередач енергетичної інфраструктури після руйнівних інцидентів (застосування БПЛА-1, дронавого типу).
3. Сканування поверхні землі на предмет виявлення та складання карти мінних полів для їх подальшого розмінування для (застосування БПЛА-3 на висоті 50–80 см, режим FPV в нічний час).
4. Керування наземною туреллю-розміновувачем на відстань до 2000 м (застосування БПЛА-4, встановленого на даній турелі).

Вибір приймача-передавача на основі обґрунтованих технічних вимог. Технічні вимоги до бортової радіостанції БПЛА та її управління доцільно сформулювати згідно з наступними положеннями:

1. Швидкість передачі даних змінюється оператором дискретно на програмному рівні $V=1,9/4/8/17/25/...$ до 100 Мбіт/с в кожному діапазоні частот. Можливий адаптивний автоматичний режим зміни параметру відповідно до умов розповсюдження радіохвиль.
2. Реалізація адаптивного режиму роботи передавача по потужності та виду модуляції з ціллю мінімізації вихідної потужності передавача.
3. Реалізація можливої зміни частотних пар роботи радіолінії під час польоту на пари частот, які не вражені завадою.
4. Здійснення віддаленого контролю заводою обстановки на борту БПЛА за параметрами:
 - рівень радіосигналу на прийомі бортової радіостанції БПЛА;
 - відношення сигнал/(шум + завада) – в графічному форматі;
 - коефіцієнт помилок BER – в графічному форматі;
 - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) радіоканалу – частотна характеристика еквалайзера в графічному форматі (Equalizer graph);
 - констеляційна діаграма – в графічному форматі;
 - спектр сигналу на прийомі бортової радіостанції БПЛА.
5. Здійснення віддаленого контролю стану заряду акумуляторних батарей.
6. Забезпечення затримки поточкових відеоданих ≤ 5 мс.
7. Здійснення віддаленого контролю внутрішньої температури бортової радіостанції БПЛА.
8. Забезпечення захисту від потужного електромагнітного імпульсу (ЕМІ).
9. Забезпечення захисту від пилу та вологи за стандартом IP67 та роботи в кліматичних умовах $-33...+55^{\circ}\text{C}$.
10. Забезпечення стійкості до польотних вібрацій різного характеру та прискорень до 2G.
11. Реалізація уніфікованого мережевого Ethernet-інтерфейсу.

Відповідно до наведених положень, сформовані технічні вимоги зведені у таблицю 3.

Проведений аналіз профільних ринкових пропозицій показав, що означеним у таблиці 3 вимогам задовольняє низка виробів, зокрема приймач-передавач Interga-G, виробництва SAF Tehnika, м. Рига, Латвія. Зовнішній вигляд приймача-передавача представлений на рис. 3 [13].

Обґрунтування та вибір спеціальних портативних та легких антен з вузькоспрямованою ДНА. Певні технічні вимоги, що стосуються вибору антен, наведені у табл. 3, але специфіка їх застосування є підґрунтям для формулювання таких додаткових вимог:

- ширина ДНА (на рівні 3 дБ) – не менше 25° ;
- подавлення завод по боковим та заднім пелюсткам ДНА – не гірше ніж 20 дБ;
- частотний діапазон використання – 24–40 ГГц.

Проведений аналіз профільних ринкових пропозицій показав, що означеним вимогам відповідає специфічна антена: WR-28 Dual Polarized Scalar Feed. Horn Antenna, виробництва компанії Eravant, США [14].

Таблиця 3 – Технічні вимоги до основних параметрів приймача-передавача

№ з/п	Назва та одиниці виміру параметра	Значення	Примітка
1.	Діапазон частот	f26, f28	згідно з таблицею 1
2.	Вага блока приймача-передавача, кг	2,9	
3.	Вага антени, кг	0,18	
4.	Вага КХП, кг	2×0,06	
5.	Вага блоку живлення, кг	0,45	
6.	Вага контейнера (корпусу), кг	0,7	
7.	Загальна вага бортової радіостанції БПЛА, кг:	до 4,35	
8.	Струм споживання при постійній (DC) напрузі живлення V=48 В, А	0,9	
9.	Габарити блока приймача-передавача (не більше), мм	235×250×72	(довжина×висота×ширина)
10.	Габарити антен (не більше), мм	125×40×40	
11.	Інтерфейси для передачі даних	1×RJ45; 2×SFP	Gigabit Ethernet
12.	Спосіб шифрування	AES 256, AES 5899	
13.	Вбудована система аналізу заводої обстановки та характеру розповсюдження радіохвиль	в наявності	
14.	Система адаптації до умов розповсюдження радіохвиль із покроковою зміною виду модуляції	64/32/16/4 QAM	
15.	Максимальна потужність передавача, дБм	20	для режиму 4QAM
16.	Чутливість приймача, дБм	-98	при BER < 10 ⁻⁶
17.	Системний коефіцієнт підсилення, дБ	118	для режиму QAM-4, ширині спектру Δf = 1,75 МГц, швидкості передачі В = 1,9 Мбіт/с

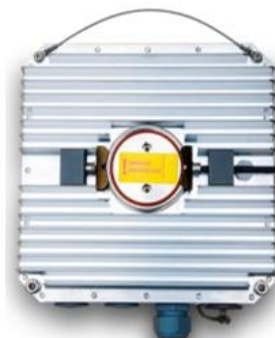
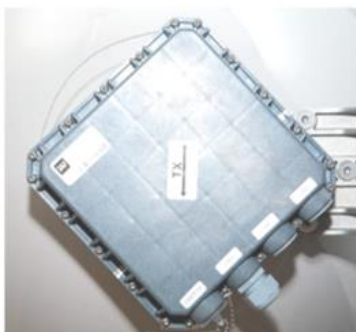
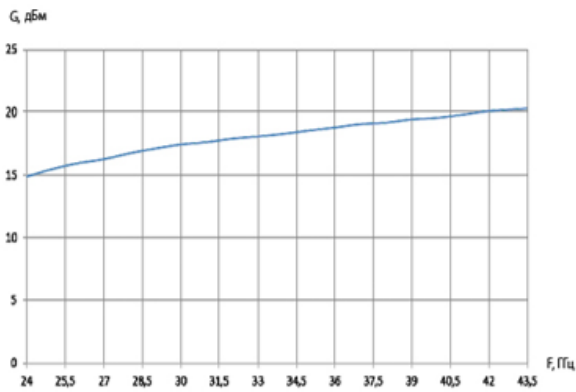
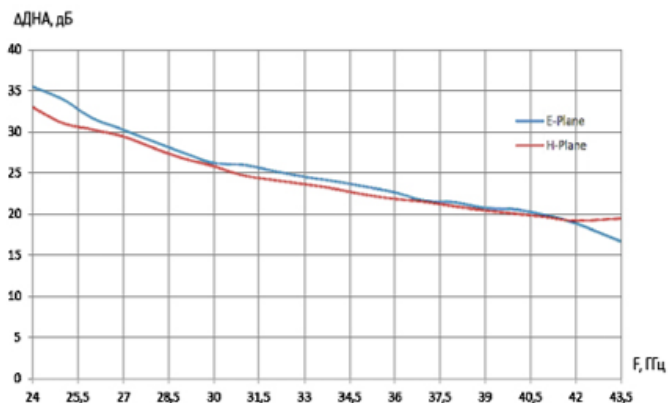


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд приймача-передавача Interga-G, виробництва SAF Tehnika

На рис. 4 показана залежність коефіцієнта підсилення антени (G), а на рис. 5 залежність ширини ДНА від центральної частоти випромінювання для обох залежностей.

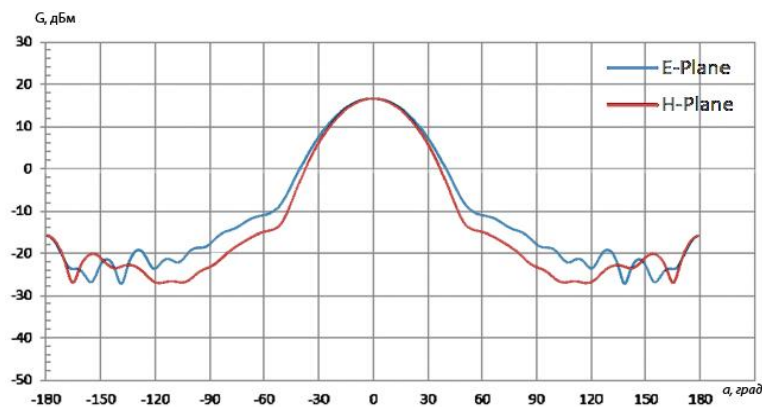


Рисунки 4 – Залежність коефіцієнта підсилення антени від частоти



Рисунки 5 – Залежність ширини ДНА від частоти

На рис. 6 представлена залежність коефіцієнта підсилення антени від напрямку антени у горизонтальній та вертикальній площині для частоти 24 ГГц. Наведені характеристики антени дозволяють стверджувати, що запропонована антена задовольняє сформульованим технічним вимогам, а саме: коефіцієнт підсилення > 15 дБі, ширина ДНА $> 25^\circ$, відсутні другий та третій бокові пелюстки ДНА, подавлення активних завад по боковим та заднім пелюсткам ДНА > 25 дБ, габарити та вага – $125 \times 40 \times 40$ мм та 171 грам.



Рисунки 6 – Залежність коефіцієнта підсилення антени від напрямку антени у горизонтальній площині

Відслідковування в реальному часі заводої обстановки на борту БПЛА та виявлення типу завад. Приймач-передавач Interga-G містить вбудовану на програмному рівні систему контролю заводої обстановки, яка дозволяє аналізувати:

[1] Рівень радіосигналу на вході радіоприймача БПЛА та відношення сигнал / шум.

Що забезпечує адаптивний вибір глибини QAM (від QAM-256 до QAM-4) модуляції для підтримання належного рівня коефіцієнта помилки прийнятого сигналу. Для кожного виду модуляції визначені граничні (мінімально припустимі) значення даних показників.

[2] Коефіцієнт помилок – BER.

У приймачі-передавачі застосоване заводостійке кодування (FEC) кодом з малою щільністю і перевіркою на парність (LDPC). Робота декодера LDPC дозволяє знизити коефіцієнт помилок на виході декодера до рівня менше ніж 10^{-10} (при надходженні на вхід декодера сигналу з показником помилок не гірше 4×10^{-2}). Це забезпечує можливість збільшити сумарну швидкість передачі інформації та покращує ефективну чутливість приймача радіосигналу.

[3] Наявність або виявлення різних типів (загороджувальної, вузькосмугової, фазової, тощо) завад.

Приймач-передавач має кілька реалізованих варіантів відслідковування наявності і визначення типу завади на вході приймача БПЛА, зокрема за аналізом: графіку АЧХ радіоканалу, зображення огинаючої спектру частот, констеляційної діаграми, тощо. Для прикладу аналізу, на рис. 7–12, наведені констеляційні діаграми для випадків: відсутності завади (рис. 7); наявності широкосмугової загороджувальної завади (рис. 8), прицільної вузькосмугової завади (рис. 9), фазового шуму (рис. 10), амплітудної компресії (рис. 11) та зображення огинаючої спектру сигналу для випадку багатопроменевості на прийомі (рис. 12).

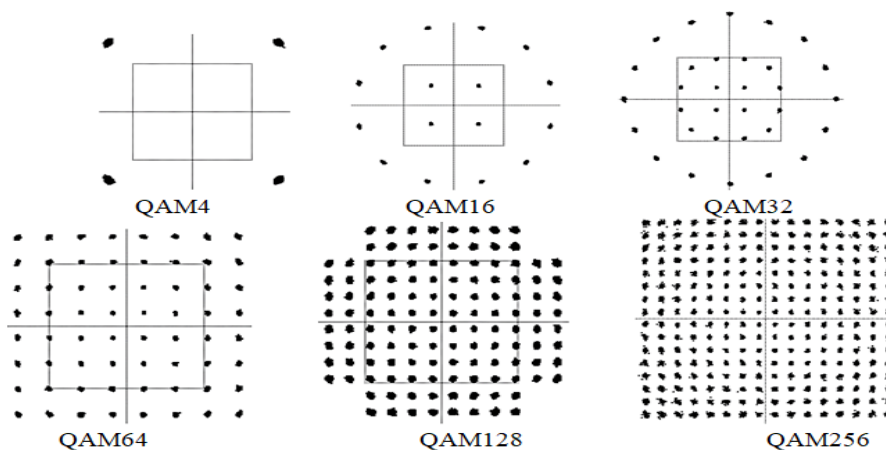


Рисунок 7 – Констеляційні діаграми при відсутності впливу завад (для QAM модуляції різної глибини)

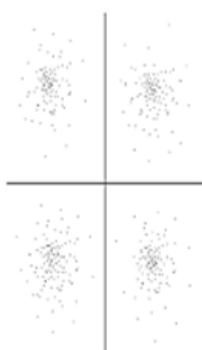


Рисунок 8 – Констеляційна діаграма при широкосмуговій загороджувальній заваді

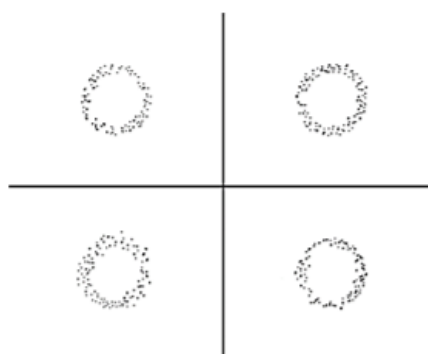


Рисунок 9 – Констеляційна діаграма при вузькосмуговій прицільній заваді

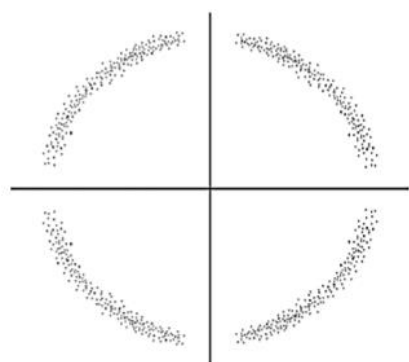


Рисунок 10 – Констеляційна діаграма при фазовому шумі

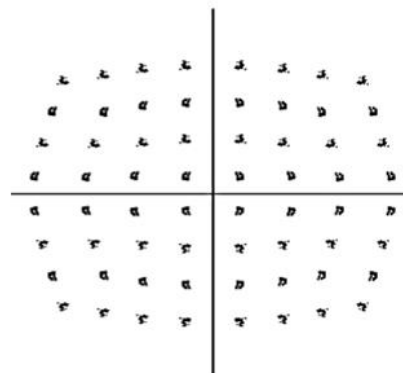


Рисунок 11 – Констеляційна діаграма при амплітудній компресії

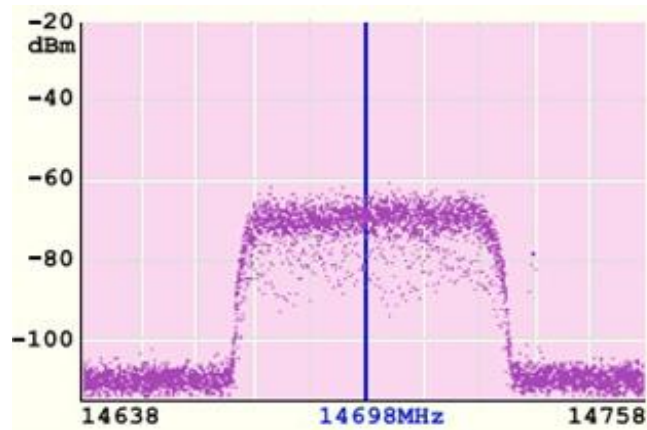


Рисунок 12 – Огинаюча спектру сигналу для випадку багатопроменевості на прийомі

Керуючись наведеними варіантами аналізу завадової обстановки пілот-оператор під час польоту контролює завадову обстановку. Оперативне виявлення навмисної завади від РЕБ надає значних переваг для захисту БПЛА, також це безперечно підвищує живучість БПЛА в умовах можливої появи в майбутньому нових активних завад в діапазоні частот 24,5...29 ГГц. Такі функціональні можливості приймача-передавача знімають потребу у використанні громіздких комплексів радіотехнічної розвідки для відслідковування завадової обстановки в зоні польотів БПЛА [14].

Забезпечення польоту в секторі без застосування антенного трекінгу. Даний режим пропонується з ціллю забезпечення більшої портативності та мобільності наземної станції управління польотом БПЛА. В такому режимі польоту застосовується направлена секторна наземна антена $\Delta\text{ДНА} = 25^\circ$ та направлена секторна антена БПЛА з аналогічними параметрами. Режим вимагає польоту БПЛА в напрямку запланованого азимуту з можливим відхиленням в секторі шириною 25° , тобто не більш $\pm 12,5^\circ$ (рисунок 13). При цьому набір висоти має відбуватися суворо за відповідною “програмою набору висоти” (рисунок 14). За умови виконання наведених на рис. 13 і 14 вимог, при польоті БПЛА буде забезпечений режим “прямої видимості” між двома антенами відсутності перешкод в першій зоні Френеля розповсюдження радіохвиль. З рисунків видно, що ширина фронту, в якій діє БПЛА, з врахуванням сектору обзору тепловізійної камери $\pm 290^\circ$, становить 2780 м. Межі набору висоти обґрунтовані на основі ДНА та корельовані з очікуваним рівнем прийому радіосигналу приймачем БПЛА для відповідної відстані [15].

Повноцінна реалізація наведеного режиму польоту та застосування пілотом всіх зазначених переваг потребує наявності другого оператора, що буде здійснювати спостереження саме за даними телеметрії приймача БПЛА, відслідковувати наявність впливу РЕБ і приймати рішення щодо варіанту реагування пілота у таких випадках. Робота другого оператора та його взаємодія з пілотом вимагають спеціальної підготовки, для чого буде потребуватися організація курсів для відповідної підготовки.

Розрахункова частина. Для обраного приймача-передавача доцільні розрахунки орієнтовного значення сигналу на вході радіоприймача на борту БПЛА. Вони були проведені для декількох значень відстані між ПНСУ та БПЛА в діапазоні між 200 м та 5000 м. У таблиці 4 наведений порядок реалізації розрахунку на прикладі відстані 5000 м, з зазначенням посилань на документи, що містять відповідні методики розрахунків, рекомендовані міжнародними інституціями зі стандартизації, зокрема Міжнародного Союзу Електрозв’язку (МСЕ/ITU – *International Telecommunication Union*). Результати розрахунків для інших значень відстані представлені у вигляді графіка / гістограми на рисунку 15. Всі розрахунки проведені з урахуванням затухання радіосигналу в водній парі, в газах та в хмарах на найгірший випадок та за умови відсутності дощу та наявності “прямої видимості” між антенами ПНСУ та БПЛА.

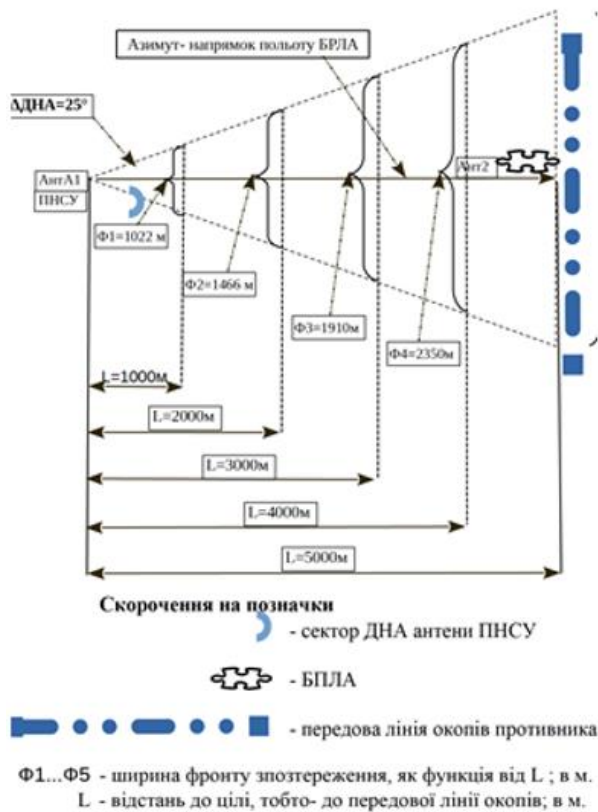


Рисунок 13 – Ширина сектору дій БПЛА

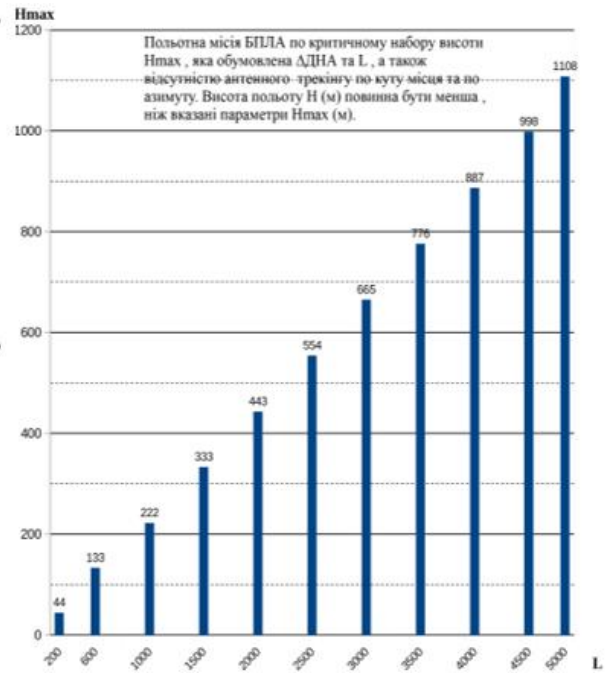


Рисунок 14 – Програма набору висоти БПЛА

Таблиця 4 – Розрахунок параметрів радіолінії передачі даних і управління БПЛА

№ з/п	Параметри		Примітка
	найменування	значення	
1.	Відстань між антенами ПНСУ та БПЛА, м	5000	L
2.	Діапазон частот, ГГц	24,5.....26,5	f26
3.	Ширина спектру радіосигналу, МГц	1,75	мінімально припустима
4.	Вид модуляції	4QAM	мінімально можливий
5.	Швидкість передачі, Мбіт/с	1,9	дуплекс
6.	Частота передачі, ГГц	26,5	найбільша з доступних
7.	Потужність передавача, гарантована, дБм	19	Р _{ПРД}
8.	Чутливість приймача, дБм	-98,5	при BER=10 ⁻⁶
9.	Коефіцієнт підсилення антени, дБі	15×2=30	рисунок 4 (G _a)
10.	Затухання джамперів (2 од.), дБ	1,18×2=2,36	рисунок 1
11.	Затухання КХП (2 од.), дБ	0,7×2=1,4	рисунок 1
12.	Ширина першої зона Френеля, м	3,7518	в середина траси
13.	Довжина хвилі, см	1,13	
14.	Затухання у вільному просторі, дБ Rec. ITU-R P.525-3 [9]	134,8861	без врахування затухань у газах, водній парі та хмарах (L _{bf})

Кінець таблиці 4

15.	Рівень сигналу на вході радіоприймача, дБм Rec. ITU-R P.341-7 [10]; Rec. ITU-R P.530-18 [11]	□ -89,6461	“відкритий інтервал”
16.	Енергетичний запас, дБ	8,8539	без врахування затухань у газах, водній парі та хмарах
Розрахунок затухання в газах (водна пара та повітря)			
17.	Затухання в парах води, дБ/км Rec. ITU-R P.676-7 [12]	0,16	
18.	Затухання у повітрі, дБ/км Rec. ITU-R P.676-7 [12]	0,014	кисень, азот
19.	Сумарне затухання, дБ/км	0,174	водна пара + повітря
20.	Загальне затухання в парах води та повітря на всій трасі, дБ	0,87	водна пара + повітря
Розрахунок глибини плоских завмирань (затухання в шаруватих хмарах)			
21.	Глибина плоских затухань, дБ Методика розрахунку РРЛ [13].	0,5672	формула (4.9)
22.	Узагальнюючий Енергетичний запас (з врахуванням затухання в газах та з врахуванням плоских завмирань), дБ	7,417	без врахування дощів
23.	Рівень сигналу на прийомі з врахуванням всіх складових, дБм	-91,0833	
24.	Контрольний (орієнтовний) рівень сигналу на прийомі, дБм	85	рисунок 15
25.	Запас на завмирання для пілотної місії, дБ	6,08331	

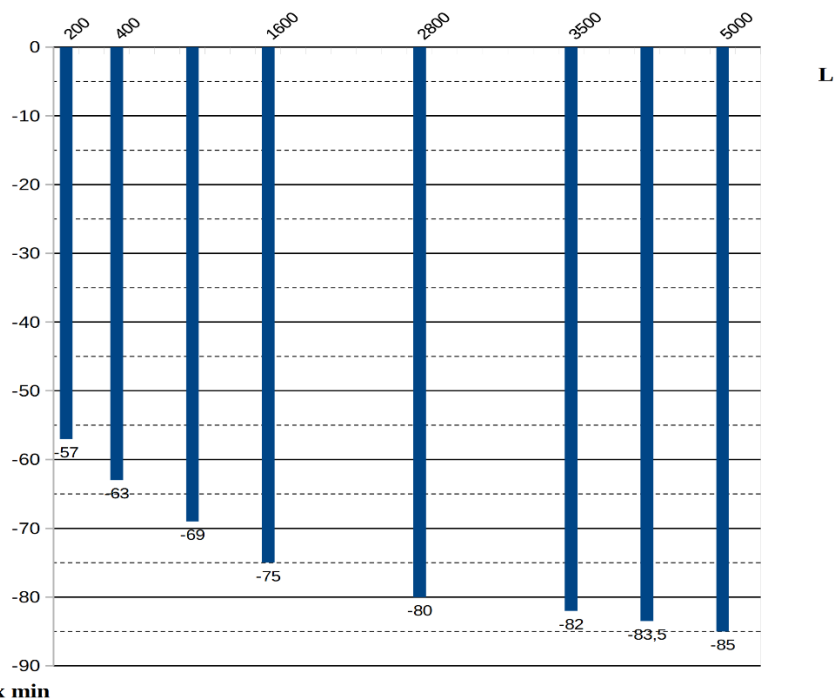


Рисунок 15 – Контрольні (орієнтовні) рівні радіосигналу на вході приймача БПЛА

Висновки. Обґрунтовані технологічні рішення, за умови одночасного їх застосування, забезпечують комплексне рішення для завадозахисту радіолінії передачі даних і управління БПЛА від впливу сучасних РЕБ, що підвищує живучість БПЛА при виконанні функцій за призначенням на відстань польоту БПЛА до 5000 м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] TOR-2M. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://missilery.info/missile/tor-m2>. Дата звернення: Вер. 22, 2023.
- [2] Tor. [Online]. Available: <https://www.militarytoday.com/missiles/tor.htm>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [3] TOR-2M. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://war-russia.info/index.php/nomenklatura-vooruzhenij/334-sukhoputnye-vojska/pvo/samokhodnye-zenitno-raketnye-kompleksy/1204-divizionnyj-zrk-maloj-dalnosti-9k330-tor-sa15-gauntlet-1986g>. Дата звернення: Вер. 22, 2023.
- [4] Enemy electronic warfare equipment. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/zasobi-radioelektronnoi-borotbi-voroga>. Дата звернення: Вер. 25, 2023.
- [5] Проти дронів України застосовують комплекси “Стриж-3”. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://mil.in.ua/uk/news/proty-droniv-ukrayiny-zastosovuyut-kompleksy-stryzh-3>. Дата звернення: Вер. 26, 2023.
- [6] P-340РП “Поле-21”. [Електронний ресурс]. Доступно: https://defence-ua.com/army_and_war/jaki_zasobi_reb_i_jak_vikristovuvalis_u_vijni_za_nagirnij_karabah-5653.html. Дата звернення: Вер. 23, 2023.
- [7] “Поле-21”. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://focus.ua/digital/557429-vs-rf-ustanavlivaют-moduli-reb-pole-21-na-domah-i-vyshkah-svyazi-zachem-eto-im-nuzhno>. Дата звернення: Вер. 27, 2023.
- [8] Антидронові рушниці ЛПД-820. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://focus.ua/uk/digital/587085-vojska-rf-poluchili-antidronovye-ruzhya-s-detektorom-bpla-chem-oni-grozyat-bespilotnikam-vsua>. Дата звернення: Вер. 23, 2023.
- [9] R. Austin, *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment*. Hoboken, NJ, USA: Wiley & Sons, 2010.
- [10] “Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.341-7-201908-I/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [11] “Recommendation ITU-R. P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-18-202109-I/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [12] “Recommendation ITU-R P.676-7. Attenuation by atmospheric gases”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-7-200702-S/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [13] *Методика розрахунку трас аналогових і цифрових РРЛ прямої видимості*. Г. Г. Кудрявцев, Ред. Київ, Україна: Міністерство зв’язку, 1987.
- [14] Eravant. [Online]. Available: <https://www.eravant.com/>. Accessed on: Sep. 21, 2023.
- [15] “Recommendation ITU-R P.525-3 (09/2016). Calculation of free-space attenuation”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-3-201611-S/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2023.

REFERENCES

- [1] TOR-2M. [Online]. Available: <https://missilery.info/missile/tor-m2>. Дата звернення: Вер. 22, 2023.
- [2] Tor. [Online]. Available: <https://www.militarytoday.com/missiles/tor.htm>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [3] TOR-2M. [Online]. Available: <http://war-russia.info/index.php/nomenklatura-vooruzhenij/334-sukhoputnye-vojska/pvo/samokhodnye-zenitno-raketnye-kompleksy/1204-divizionnyj-zrk-maloj-dalnosti-9k330-tor-sa15-gauntlet-1986g>. Accessed on: Sep. 22, 2023.
- [4] Enemy electronic warfare equipment. [Online]. Available: <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/zasobi-radioelektronnoi-borotbi-voroga>. Accessed on: Sep. 25, 2023.
- [5] Ukraine uses Strizh-3 systems against drones. [Online]. Available: <https://mil.in.ua/uk/news/proty-droniv-ukrayiny-zastosovuyut-kompleksy-stryzh-3>. Accessed on: Sep. 26, 2023.
- [6] P-340RP “Pole-21”. [Online]. Available: https://defence-ua.com/army_and_war/jaki_zasobi_reb_i_jak_vikristovuvalis_u_vijni_za_nagirnij_karabah-5653.html. Accessed on: Sep. 23, 2023.
- [7] “Pole-21”. [Online]. Available: <https://focus.ua/digital/557429-vs-rf-ustanavlivayut-moduli-reb-pole-21-na-domah-i-vyshkah-svyazi-zachem-eto-im-nuzhno>. Accessed on: Sep. 27, 2023.
- [8] Anti-drone guns LPD-820. [Online]. Available: <https://focus.ua/uk/digital/587085-voyska-rf-poluchili-antidronovye-ruzhya-s-detektorom-bpla-chem-oni-grozyat-bespiilotnikam-vsu>. Accessed on: Sep. 23, 2023.
- [9] R. Austin, *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment*. Hoboken, NJ, USA: Wiley & Sons, 2010.
- [10] “Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.341-7-201908-I/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [11] “Recommendation ITU-R. P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-18-202109-I/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [12] “Recommendation ITU-R P.676-7. Attenuation by atmospheric gases”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-7-200702-S/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.
- [13] *Methodology for calculating analogue and digital line-of-sight radar routes*. G. Kudryavtsev, Ed. Kyiv, Ukraine: Ministry of Communications, 1987.
- [14] Eravant. [Online]. Available: <https://www.eravant.com/>. Accessed on: Sep. 21, 2023.
- [15] “Recommendation ITU-R P.525-3 (09/2016). Calculation of free-space attenuation”, *P Series. Radiowave propagation*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-3-201611-S/en>. Accessed on: Sep. 19, 2023.

OLEKSANDR SALIY,
VLADYSLAV HOL,
ANDRII DIVITSKYI,
OLEKSIY KHAKHLYUK

A COMPLETE SOLUTION FOR ANTI-JAMING RADIO DATA-LINK OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

The effectiveness of an unmanned aerial vehicle's flight mission over a given distance depends on many factors. However, one of the key factors in the successful completion of a flight mission is the availability of high-quality management and control of telemetry by an unmanned aerial vehicle, which in turn is determined by a reliable radio communication between the ground control station and the unmanned aerial vehicle.

The current stage of use of unmanned aerial vehicles is characterised by the use of active jammers of various types and purposes, the purpose of which is to disable control channels, navigation channels, telemetry channels and data transmission channels of FPV unmanned aerial vehicles in order to prevent the successful completion of the flight mission of the vehicle.

The article considers conceptual issues of implementing a guaranteed interference-free radio data transmission and control of an unmanned aerial vehicle in the conditions of active jamming interference when combining various technological solutions. These solutions include the selection and justification of a special frequency range, the use of structural circuit solutions for interference protection of the radio data transmission and control line; the use of a specific scheme for organising communication with an unmanned aerial vehicle; the use of a transceiver and portable and light antennas for the radio channel that meet reasonable technical requirements; the implementation of the possibility of real-time monitoring of the interference situation on board the unmanned aerial vehicle and detection of the type of interference; ensuring flight in the sector.

The requirements were justified and options for selecting a transceiver and antenna were proposed. A structural diagram of the radio line is developed and options for its use as a data transmission and control radio line for an unmanned aerial vehicle are proposed.

Examples of real-time tracking of the interference situation on board an unmanned vehicle and detection of the type of interference are given. A flight option in the sector without the use of antenna tracking is calculated and justified. The approximate values of the signal at the receiver input of the unmanned vehicle are calculated.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control channel, interference immunity, FPV mode, active jamming, transceiver, narrow-directional antenna pattern, calculation of radio link parameters, real-time analysis of the interference situation.

Салій Олександр Сергійович, молодший науковий співробітник науково-дослідної спеціальної лабораторії № 2 Науково-дослідного центру, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0009-0002-7021-5288, e-mail: os.telcom2024@gmail.com.

Голь Владислав Дмитрович, кандидат технічних наук, професор, завідувач Спеціальної кафедри № 1, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-9995-9590, e-mail: vlad-gol@ukr.net.

Дівіцький Андрій Сергійович, старший викладач Спеціальної кафедри № 1, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-9261-9841, e-mail: 70div@ukr.net.

Хахлюк Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент Спеціальної кафедри № 1, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0003-1749-0109, e-mail: khakhlyuk@gmail.com.

Saliy Oleksandr, Junior researcher at the Research special laboratory No. 2 of the Research centre, Institute of special communications and information Protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Hol Vladyslav, PhD. in engineering, professor, Head of the special department No. 1, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Divitskyi Andrii, Senior lecturer, Special department No. 1, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

Khakhlyuk Oleksiy, PhD. in engineering, associate professor of the Special department No. 1, Institute of special communication and information protection of the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.