

---

## ELECTRONIC COMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS

---

DOI 10.20535/2411-1031.2024.12.2.315765

УДК 621.396

ОЛЕКСАНДР САЛІЙ,  
ВЛАДИСЛАВ ГОЛЬ

### МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДАЛЬНОСТІ ПОЛЬОТУ БПЛА ПРИ ВИКОРИСТАННІ РЕЖИМУ FPV ТА ЗАСТОСУВАННІ РАДІОЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

**Анотація.** На поточному етапі виробництва різноманітних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в режимі польоту “від першої особи” (first person view, FPV) для окремих комплектів БпЛА-FPV та станцій наземного керування (СНК) відсутні індивідуальні паспорти з інформацією про максимально можливу дальність польоту при застосуванні відповідної моделі цифрової відео-камери (в тому числі і тепловізійної) та використанні радіолінії зв'язку сантиметрового діапазону частот.

Тому головною метою статті є підбір та розробка методів вимірювання основних параметрів приймача-передавача БпЛА та СНК в лабораторних умовах, з використанням розробленого “імітатора радіолінії зв'язку передачі даних” з подальшим розрахунком, на основі відповідних міжнародних стандартів, максимально можливої дальності польоту та складання відповідної “польотної карти”.

Основними результатами статті є: розроблена методика визначення максимально можливої дальності польоту БпЛА в режимі FPV в лабораторних умовах для діапазону частот 7К 38 ГГц, що базується на сукупності розроблених експериментально-емпіричних методів вимірювань та на теоретичних методах розрахунків, згідно рекомендацій ІТУ (*International Telecommunication Union*; Міжнародний Союз по Телекомунікаціям).

Матеріали статті становлять практичну цінність для планування та організації польотної місії мультироторних БпЛА на задану відстань, а також для діяльності підрозділів регламентного обслуговування БпЛА по факту повернення БпЛА із польотних місій з метою перевірки їх технічних параметрів.

**Ключові слова:** БпЛА, FPV, радіолінія передачі даних, імітатор радіолінії сантиметрового діапазону частот, лабораторна установка, максимальна дальність польоту БпЛА в режимі FPV.

**Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Згідно [1] та [2] на сучасному етапі розвитку індустрії виробництва БпЛА спеціального призначення, по факту створення 06 лютого 2024 року Сил безпілотних систем ЗС України, актуальною є задача створення різноманітного переліку рою дронів в режимі віддаленого управління “від першої особи” (FPV – First Person View) для безпілотних авіаційних комплексів (БпАК), радіолінії яких повинні одночасно працювати в широкому діапазоні частот від 1,0 ГГц до 38 ГГц, з ціллю захисту каналів управління та передачі відео-даних БпЛА-FPV від “окопного РЕБу” ворога (діапазон частот 0,1К 6 ГГц) та від впливу ворожих радіолокаційних станцій (РЛС), які діють в діапазоні частот 2К 18ГГц [1, табл. 1].

Сучасний стан розробників БпЛА-FPV характеризується великою номенклатурою приймачів-передавачів для БпЛА та станцій наземного керування (СНК) для виконання різноманітних польотних місій, які використовуються або на базі існуючих комерційних дронів та комплексів, або на базі спеціальних розробок БпАК виробничого комплексу країн-виробників НАТО та України.

При цьому кожний приймач-передавач БпЛА-FPV конкретного типу БпАК має свої індивідуальні параметри:

1) фактична максимальна потужність передавача БпЛА, як функція від частоти передачі ( $P_{1\sigma\text{-max}}$ );

2) ефективна чутливість приймача радіостанції СНК з урахуванням технічних можливостей відеокамери на борту БпЛА ( $P_{0ne}$ ).

Знання даних параметрів забезпечить точний розрахунок максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FP ( $d_{0e\text{max}}$ ), з урахуванням особливостей розповсюдження радіохвиль відповідного діапазону частот в умовах земної тропосфери та її властивостей, які залежать від кліматичних умов. Також, знання параметру ( $d_{0e\text{max}}$ ) значно підвищить якість передпольотної підготовки, планування та виконання польотної місії на вказану заплановану відстань.

Тому актуальна задача розробити методи визначення параметрів приймача-передавача з подальшим синтезом методики визначення максимальної дальності польоту для кожного БпЛА в режимі FPV.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних експериментальних досліджень розповсюдження радіохвиль сантиметрового діапазону частот з використанням вимірювальних приладів в лабораторних умовах проведений на основі відкритих відомостей [2]–[6]. У вищевказаних роботах [3]–[6] відсутня методика вимірювань параметрів приймача-передавача для розрахунку максимальної дальності польоту в режимі FPV в умовах польоту за межами міських забудов, що є основним видом польотів БпЛА мультироторного типу бойового призначення.

Також, в роботі [2] розглянуті лише аспекти алгоритму визначення максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FPV сантиметрового діапазону частот без розробки деталізованої методики.

**Постановка задачі.** Аналіз сучасних цивільних БпЛА з режимом FPV, що масово застосовуються для виконання польотних завдань, засвідчує, що вони не здатні протистояти “окопним РЕБ”, які, як правило, працюють в діапазоні частот 0,1К 6 ГГц [1].

Тому, згідно [2], використовується лабораторна установка, яка імітує організацію радіолінії між СНК та БпЛА, з метою зменшення впливу засобів “окопного РЕБ”, та пропонується переходити до використання діапазону частот більшого за 7 ГГц.

Враховуючи результати, які обґрунтовані в [2], для якісного виконання польотного завдання оператор БпЛА повинен знати, до початку планування польотної місії, наступні параметри:

- чутливість приймача СНК ( $P_{0n}$ );
- ефективну чутливість приймача СНК ( $P_{0ne}$ ) з урахуванням технічних можливостей відео-камери;
- чутливість приймача на борту БпЛА ( $P_{0\sigma}$ );
- максимальну вихідну потужність радіопередавача БпЛА ( $P_{1\sigma\text{-max}}$ ) та стабільність його роботи на заданій частоті передачі;
- максимально допустиму відстань польоту при збереженні якісного зображення в режимі FPV та забезпеченні в реальному часі умови “відкритого радіоінтервалу”, за відсутності дощу, туману тощо ( $d_{0e\text{max}}$ );
- залежність рівня сигналу на вході СНК від відстані, на якій знаходиться БпЛА (“діаграма польоту” / польотна карта).

**Мета роботи:** на основі алгоритму [2] синтезувати методику, результатом якої є визначення максимально можливої дальності польоту БпЛА мультироторного типу в режимі

FPV в діапазоні частот 7К 38 ГГц; на конкретному прикладі, на основі розробленої методики, визначити максимально можливу дальність польоту із складанням діаграми польотної місії і польотної карти.

**Основні технологічні рішення для виконання поставленої задачі.** Для виконання цільової функції (визначення в лабораторних умовах для відповідного БпАК максимально можливої дальності польоту  $d_{0e\max}$  в режимі FPV) необхідно, базуючись на результатах [2], розробити:

- методику визначення максимально можливої дальності польоту БпЛА в режимі FPV в лабораторних умовах для діапазону частот 7К 38ГГц;
- на окремому прикладі відпрацювати розроблену методику з отриманням відповідних результатів і висновків та виконати відповідні розрахунки на основі існуючих стандартів ІТУ за умови “відкритого радіо-інтервалу”;
- на основі розробленої методики навести приклад визначення максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FPV та параметрів польотної карти.

#### *Початкові дані*

Методика базується на алгоритмі вимірювань, що розроблений в роботі [2], та містить дев'ять етапів:

a1) монтаж-складання “імітатора радіолінії” згідно структурної схеми, задіяних портативних вимірювальних приладів, антено-фідерних пристроїв, радіочастотних атенюаторів та джамперів;

a2) вимірювання рівня затухання еталонних атенюаторів, які задіяні в імітаторі радіолінії на заданій радіочастоті;

a3) вимірювання максимальної потужності передавача  $P_{1\sigma-\max}$  БпЛА при заданій частоті радіопередачі, відомому виді модуляції, швидкості передачі інформації та перевірка стабільності його роботи;

a4) аналіз стабільності частоти  $f_{tx}$  передавача БпЛА, при визначеній максимальній реальній потужності передавача БпЛА  $P_{1\sigma-\max}$ , відомому виді модуляції та швидкості передачі інформації;

a5) вимірювання чутливості приймача  $P_{0n}$  СНК при заданій частоті радіопередачі БпЛА, відомому виді модуляції, швидкості передачі інформації; та перевірка стабільності його роботи без підключеної відеокамери;

a6) вимірювання чутливості приймача  $P_{0ne}$  СНК при заданій частоті радіопередачі БпЛА, відомому виді модуляції, швидкості передачі інформації при підключеній відеокамері на борту БпЛА;

a7) розрахунок максимальної дальності польоту  $d_{0e\max}$  для каналу радіолінії FPV (з урахуванням технічних можливостей відеокамери) на основі рекомендацій ІТУ;

a8) розрахунок польотної карти БпАК;

a9) внесення отриманих результатів вимірювань у розроблений паспорт радіолінії передачі даних БпАК.

#### *Обмеження методики*

Методика обмежується використанням БпЛА в режимі FPV та застосуванням радіолінії зв'язку у сантиметровому діапазоні частот. Приймачі-передавачі БпЛА та СНК повинні мати стандартні інтерфейси у відповідності до стандартів НАТО для роботи в єдиному інформаційному IP-просторі системи управління операціями, тобто мати інтерфейс доступу Ethernet (RJ-45 або LC) для підключення до пілотного контролера.

*Етапи реалізації методики.* На основі алгоритму вимірювань [2] синтезована методика, яка містить сукупність емпіричних та теоретичних методів, і відображає та деталізує вищезазначені етапи a1...a9. При деталізації та обґрунтуванні методів (на яких базується

розроблена методика) у відповідних наведених структурних схемах вимірювань використані наступні скорочення та позначки згідно [2]:

- SA (Spectrum Analyser – портативний спектроаналізатор);
- SG (Signal Generator – портативний генератор радіосигналу);
- $A_{xx}$  (комплект фіксованих атенюаторів 1...40 дБ, 0...40 ГГц);
- BM (BER-тестер, вимірювач коефіцієнта помилок “bit to error”; вбудований тестер в приймач БпЛА та СНК);
- RC (радіочастотний кабель для тестування /джампер/ 0...43 ГГц);
- WCA (коаксіально-хвильовий адаптер);
- TE (комплект імітатора радіолінії передачі даних у вільному просторі);
- A40 (атенюатор номіналом 40 дБ, 0...40 ГГц);
- 1 – прийомо-передавач СНК;
- 5 – прийомо-передавач БпЛА;
- ■ — ■ радіочастотний джампер RC в діапазоні частот ОК 43 ГГц.

Структурна схема лабораторної установки “Імітатора радіолінії БпАК в режимі FPV” представлена на рисунку 1.

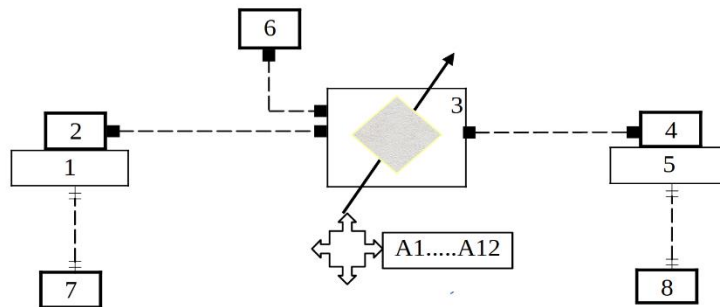


Рисунок 1 – Структурна схема лабораторної установки імітатора радіолінії БпАК в режимі FPV [2]

Опис схеми дослідження, відображеної на рисунку 1, детально розглянуто в [2].

*Етап 1:* розроблені спеціальні методи дослідження – емпіричні експерименти проводяться на основі розробленого “імітатора радіолінії”. Імітатор радіолінії імітує розповсюдження радіохвилі у “вільному просторі” (тобто відсутність рефракції, дифракції, затухання в хмарах, гідрометеорах, дощ-сніг-туман, затухання в газах; відсутність пасивних та активних завад). Згідно а1) виконуємо монтаж-складання лабораторної установки “імітатора радіолінії” згідно з рисунком 1. Використання імітатора радіолінії БпАК в режимі FPV дозволить проводити дослідження параметрів прийомо-передавальних пристроїв, необхідних для розрахунку максимально допустимих відстаней польоту  $d_{0e\max}$  та складання “діаграми польоту” (польотної карти) БпЛА до моменту виконання польотного завдання. Необхідність польотної карти обґрунтована в [2].

*Етап 2:* розроблений метод вимірювання/перевірки еталонних атенюаторів, як функція від частоти радіопередавача БпЛА-FPV,  $A_{xx} = F(f_{ix})$ ; тип методу дослідження – емпіричний експеримент. Згідно етапу а2) структурна схема вимірювання рівня затухання еталонних атенюаторів  $A_{xx}$  (згідно таблиці 1, [2]) представлена на рисунку 2.

Опис схеми дослідження, відображеної на рисунку 2. Початковими даними є: частота радіосигналу передавача БпЛА  $f_{ix}$ . Згідно технічної документації та інструкції по користуванню SG, виставити на генераторі синусоїдальних сигналів необхідну радіочастоту  $f_{ci}$  з вихідним рівнем 0 дБмВт ( $P_{ix}$ ). За допомогою спектроаналізатора рівня SA зафіксувати

спектр сигналу на дисплеї SA при мінімальному діапазоні сканування спектра частот; в режимі виміру рівня радіосигналу SA зафіксувати рівень сигналу в дБмВт ( $P_{rx}$ ). Вирахувати рівень затухання радіосигналу, що вносить досліджуваний атенюатор  $A_{xx}$  за формулою  $A_{xx}(\text{дБ}) = P_{tx} - P_{rx} - 2A_{rc}$  (де  $A_{rc}$  – затухання радіосигналу, що вносить джампер RC на частоті  $f_{tx}$  ГГц, яке знаходимо згідно [7] із графіка, з урахуванням довжини джамперу 0,5 м) (наприклад, для 40 ГГц  $A_{rc} = 6/3 = 2$  дБ). Занести дані в таблицю відповідності повірених атенюаторів для частоти  $f_{ci}$ . Процедуру, для частоти генерації  $f_{ci}$ , повторити для всіх градацій атенюаторів  $A_{xx}$  (згідно Таблиці 1, [2]). Заповнити таблицю відповідності номіналів  $A_{xx}$  для частоти  $f_{ci}$  (яка відповідає частоті передавача БПЛА  $f_{tx}$ ).

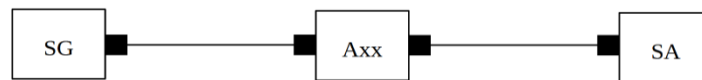
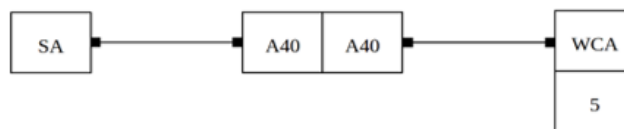


Рисунок 2 – Структурна схема вимірювання рівня затухання еталонних атенюаторів  $A_{xx}$

Зовнішній вигляд портативного тактичного генератора SG та портативного спектроаналізатора SA представлений в [2, рис 6а) та 6б)].

*Етап 3: розроблений метод вимірювання реальної максимальної вихідної потужності радіопередавача БПЛА, як функції від частоти радіопередавача БПЛА-FPV, виду модуляції, від ширини спектру радіосигналу та швидкості передачі даних,  $P_{1\delta\text{-max}} = F(f_{tx}; \text{mod}; DFs; B)$ ; тип методу дослідження – емпіричний експеримент.* Згідно етапу а3) структурна схема вимірювання максимальної реальної потужності передавача  $P_{1\delta\text{-max}}$  БПЛА, при заданій частоті радіопередачі  $f_{tx}$ , виді модуляції та швидкості передачі інформації, представлена на рисунку 3.



5 – прийомо-передавач БПЛА (згідно рисунку 1)

Рисунок 3 – Структурна схема вимірювання максимальної реальної потужності передавача  $P_{1\delta\text{-max}}$  БПЛА

*Опис схеми дослідження, відображеної на рисунку 3. Початковими даними є:*

- частота радіосигналу передавача БПЛА  $f_{tx}$ ;
- номінальна максимальна потужність передавача БПЛА  $P_{tx\text{-max-nom}}$ ;
- вид модуляції (mod);
- швидкість передачі інформації B (Мбіт/с).

Дані параметри виставляються програмними засобами за допомогою web-браузера ноутбука, підключеного до прийомо-передавача на основі відповідної технічної документації для заданого БПЛА.

Знайти на мікромоніторі спектроаналізатора SA спектр радіосигналу [8], який генерується передавачем та вимірюємо рівень радіосигналу  $P_{rx}$  в дБмВт згідно інструкції SA. Вирахувати реальну максимальну потужність передавача БПЛА  $P_{tx\text{-max-r}}$  за формулою:

$$P_{tx\text{-max-r}} = P_{rx} + (2 \times A40r) + A_{wca},$$

де  $A40r$  – реальне значення атенюатора 40 дБ, який повірений на стадії вимірювань етапу 2;

$A_{wca} = 0,4$  дБ (згідно таблиці 1, [2]);

$$P_{tx-max-r} = P_{1\sigma-max}$$

**Етап 4:** розроблений метод візуального спостереження стабільності частоти передавача та реальної максимальної вихідної потужності радіопередавача БпЛА, як функції від частоти радіопередавача БпЛА-FPV  $f_{tx}$ , виду форми спектру радіосигналу на заданій частоті; тип методу дослідження – емпіричне спостереження. Згідно етапу а4) структурна схема аналізу стабільності частоти  $f_{tx}$  передавача БпЛА, при визначеній максимальній реальній потужності передавача БпЛА  $P_{1\sigma-max}$ , відомому виді модуляції та швидкості передачі інформації представлена на рисунку 3.

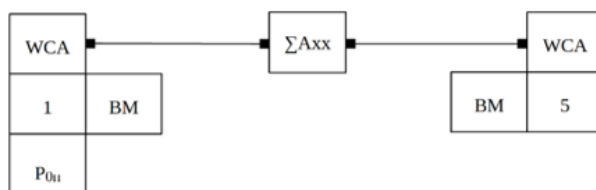
Даний етап вимірювання аналогічний етапу 3, але об'єм дослідження обмежується візуальним аналізом огинаючого спектру радіо-сигналу на мікромоніторі SA. Суть дослідження – тест: протягом 30 хвилин вид спектру сигналу повинен бути візуально стабільним, та рівень радіосигналу на вході SA не змінювати своє значення.

**Етап 5:** розроблений метод вимірювання реальної чутливості радіоприймача БпЛА СНК в режимі без FPV, як функція від частоти радіопередавача БпЛА-FPV, його максимальної реальної потужності; виду модуляції, від ширини спектру радіосигналу, швидкості передачі даних та затухання радіосигналу у вільному просторі,  $P_{0n} = F(f_{tx}; P_{1\sigma-max}; \text{mod}; DFs; B; A_0; d_0; A_{xx})$ ; тип методу дослідження – емпіричний експеримент та метод теоретичного розрахунку, який базований на стандартах ITU. Згідно етапу а5) структурна схема вимірювання чутливості приймача  $P_{0n}$  СНК (при заданій частоті радіопередачі БпЛА, відомому виді модуляції, швидкості передачі інформації) та перевірки стабільності його роботи представлена на рисунках 4а) та 4б). Вимірювання проходить в два етапи.

Опис схеми дослідження, відображеної на рисунку 4а. Етап №1. Початковими даними є:

- частота радіосигналу передавача БпЛА  $f_{tx}$ ;
- максимальна реальна потужність передавача БпЛА  $P_{1\sigma-max}$ ;
- вид модуляції;
- швидкість передачі інформації  $B$ ;
- задана необхідна проектована відстань польоту ( $d_0$ ) в режимі FPV.

Дані параметри  $f_{tx}$  та  $P_{1\sigma-max}$  визначені на стадії етапу 3.



5 – прийомо-передавач БпЛА згідно рисунку 1;

1 – прийомо-передавач СНК згідно рисунку 1;

BM – вбудований BER-тестер приймача СНК та БпЛА;

$P_{0n}$  – вбудований вимірювач рівня радіосигналу в дБмВт приймача СНК на частоті  $f_{tx}$ ;

$\Sigma A_{xx}$  – набір атенуаторів під'єднаних один до одного послідовно, згідно Таблиці 1 [2], які повірені з точністю до  $\pm 0,1$  дБ.

Рисунок 4а – Структурна схема вимірювання чутливості приймача  $P_{0n}$  вбудованими програмними засобами СНК, етап №1

Методом підбору визначити комплект атенюаторів  $A_{xx}$ , які повірені на частоті  $f_{tx}$  під час етапу 2. Комплект повірених атенюаторів визначається по методу, що детально розроблений в [1, розрахункова частина, таблиця 4, п.14]. Далі розрахувати затухання у вільному просторі  $A_0$  (дБ) згідно Rec. ITU-R P.525-3 [9], як функції від  $d_0$  без врахування затухань у газах, водній парі та хмарах.

Визначити склад комплекту повірених номіналів атенюаторів (згідно таблиці 1, п.3 [2]), при цьому  $A_{xx}(\text{дБ}) = A_0$  (дБ), наприклад, згідно [1, розрахункова частина, таблиця 4]:

$$A_0 (\text{дБ}) = 134,8 \text{ дБ} \gg A_{xx}(40 + 40 + 40 + 10 + 4 + 1 = 135 \text{ дБ}).$$

Змонтувати обраний комплект атенюаторів та вбудованими засобами приймача ВМ СНК визначити рівень BER. Далі методом додаткового підбору атенюаторів  $A_{xx_1}$  добитися значення BER не гірше ніж  $10^{-6}$ , тобто  $\text{BER} \leq 10^{-6}$ .

Визначити номінальну чутливість приймача  $P_{0n}$  СНК на частоті  $f_{tx}$  ( $\text{СНК} = f_{tx}$ ) БпЛА за формулою:

$$P_{0n} = P_{1\sigma\text{-max}} - 2A_{wca} - A_{xx_1} - 2A_{rc},$$

де  $A_{wca} = 0,4 \text{ дБ}$  згідно таблиці 1, [2];

$A_{xx_1}$  визначено експериментально;

$A_{rc}$  розраховується аналогічно, як на стадії етапу 2.

Таким чином, внаслідок експериментально-емпіричного дослідження, визначається величина затухання радіосигналу  $A_{xx_1}$  у вільному просторі, при рівні помилок  $\text{BER} \leq 10^{-6}$ , максимальному значенні потужності передавача  $P_{1\sigma\text{-max}}$ , та заданій початковій відстані  $d_0$  в режимі FPV.

*Опис схеми дослідження, відображеної на рисунку 4б. Етап №2.* Початковими даними є: частота радіосигналу передавача БпЛА  $f_{tx}$  (ГГц); максимальна реальна потужність передавача БпЛА  $P_{1\sigma\text{-max}}$  (дБмВт), вид модуляції; швидкість передачі інформації  $B$  (МБіт/с), задана необхідна відстань польоту  $d_0$  (км) в режимі FPV; визначений експериментально комплект атенюаторів  $A_{xx_1}$  (дБ) у вільному просторі, коли отримуємо рівень помилок  $\text{BER} \leq 10^{-6}$ .

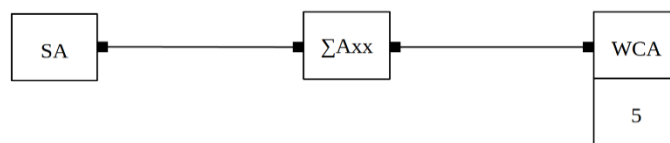


Рисунок 4б – Структурна схема вимірювання реальної чутливості приймача  $P_{0n}$  за допомогою SA, етап №2

Внаслідок вимірювань по алгоритму аналогічному етапу 3 визначити реальну чутливість приймача  $P_{0n}$  (дБмВт) СНК за формулою:

$$P_{0n} (\text{дБмВт}) = P_{1\sigma\text{-max}} - A_{wca} - A_{xx_1} - 2A_{rc}$$

та порівнюємо із заміром на мікромоніторі SA, отриманого значення  $P_{rx}$ , вибираючи найбільше значення.

*Етап 6: розроблений метод вимірювання реальної чутливості радіоприймача БпЛА СНК в режимі FPV (при застосуванні відеокамери відповідної моделі), як функція від частоти радіопередавача БпЛА-FPV, його максимальної реальної потужності; виду модуляції, від*



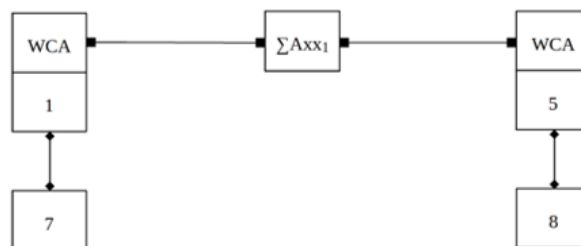
ширини спектру радіосигналу, швидкості передачі даних та згасання радіосигналу у вільному просторі,  $P_{0не} = F(f_{tx}; P_{1б- max}; \text{mod}; DFs; B; A_0; d_0; Axx_2)$  тип методу дослідження – емпіричний експеримент та метод теоретичного розрахунку, який базований на стандартах IITU. Згідно алгоритму вимірювань, етапу аб) відповідає структурна схема вимірювання чутливості приймача  $P_{0не}$  СНК, при заданій частоті радіопередачі БпЛА, максимальній потужності радіопередавача  $P_{1б- max}$ , відомому виді модуляції, швидкості передачі інформації, за умови підключення відеокамери на борту БпЛА, що представлена на рисунках 5а та 5б. Вимірювання проходить в два етапи.

Опис схеми дослідження, зображеної на рисунку 5а. Етап №1. Початковими даними є:

- частота радіосигналу передавача БпЛА  $f_{tx}$  (ГГц);
- максимальна реальна потужність передавача БпЛА  $P_{1б- max}$  (дБмВт);
- вид модуляції;
- швидкість передачі інформації  $B$  (МБіт/с);
- задана необхідна проектована відстань польоту ( $d_0$ ) в режимі FPV;
- необхідний комплект атенуаторів  $Axx_1$  (дБ) у вільному просторі, для отримання

рівня помилок  $BER \leq 10^{-6}$ , який визначений на стадії етапу 5.

Перед проведенням дослідження за допомогою вбудованих сервісів IP-адміністрування організується локальна мережа між автоматизованою системою 7 та бортовою IP відеокамерою 8. За допомогою програмних засобів та технічної документації по настройці відеокамери отримати стійку картинку на мікромоніторі пульта керування СНК (як правило, дану функцію може виконувати ноутбук з відповідним програмним забезпеченням, яке сумісне з програмним забезпеченням відеокамери).



- 5 – прийомо-передавач БпЛА згідно рисунку 1;
- 1 – прийомо-передавач СНК згідно рисунку 1;

$\sum Axx_1$  – набір атенуаторів під'єднаних один до одного послідовно, які повірені з точністю до  $\pm 0,1$  дБ (етап 2) та їх склад та номінали визначені на стадії етапу 5;

7 – автоматизована система у складі: 1) контролер СНК з інтерфейсом RJ-45/Ethernet; 2) пульт керування БпЛА з інтерфейсом RJ-45/Ethernet з вбудованим мікромонітором, для отримання картинки відео в реальному часі з борту БпЛА в режимі FPV згідно рисунка 1;

8 – бортова IP відео-камера БпЛА з інтерфейсом RJ-45/Ethernet у складі: 1) контролер БпЛА з інтерфейсом RJ-45/Ethernet; 2) відео-камера БпЛА з інтерфейсом RJ-45/Ethernet в режимі FPV згідно рисунка 1;

◆ —◆ кабель вита-пара з роз'ємами RJ-45/Ethernet.

Рисунок 5а – Структурна схема вимірювання чутливості приймача  $P_{0не}$  СНК при підключеній відеокамері на борту БпЛА, етап №1



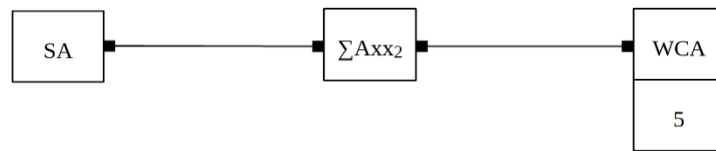


Рисунок 5б – Структурна схема вимірювання чутливості приймача  $P_{0ne}$  при підключеній відеокамері на борту БпЛА, етап №2

Критерієм якісного зв'язку, який імітує “імітатор радіолінії передачі даних”, є чітка картинка на моніторі ноутбука СНК в реальному часі, яка відображає картинку відеокамери, яка встановлена на стороні прийомо-передавача БпЛА.

Суть дослідження: змінювати значення  $A_{xx_1}$  (дБ) за допомогою покрокового додавання / віднімання повірених атенюаторів з номіналом 1К 6 дБ доти, поки картинка на моніторі ноутбука СНК не перестане реагувати на відео-потік (тобто відеокартинку) з відеокамери БпЛА в реальному часі; тобто коли зміна картини в реальному часі, яку сприймає відеокамера БпЛА не буде відповідати картинці на моніторі ноутбука СНК; або буде зі значною затримкою. Таким чином, експериментально визначений параметр  $A_{xx_2}$  (дБ), коли відео-картинка на моніторі СНК “зависає”. Далі розрахувати ефективну чутливість приймача  $P_{0ne}$  СНК з урахуванням технічних можливостей підключеної відеокамери за формулою:

$$P_{0n}(\text{дБмВт}) = P_{1\sigma\text{-max}}(\text{дБмВт}) - A_{xx_2}(\text{дБ}) - 2A_{wca} - 2A_{rc}.$$

Опис схеми дослідження, відображеної на рисунку 5б. Етап №2. Початковими даними є:

- частота радіосигналу передавача БпЛА  $f_{tx}$  (ГГц);
- максимальна реальна потужність передавача БпЛА  $P_{1\sigma\text{-max}}$  (дБмВт);
- вид модуляції;
- швидкість передачі інформації  $B$  (МБіт/с);
- задана необхідна проектована відстань польоту ( $d_0$ ) в режимі FPV;
- необхідний комплект атенюаторів  $A_{xx_2}$  (дБ) у вільному просторі, при рівні помилок

$BER \leq 10^{-6}$ , який визначений на першому етапі згідно рисунка 5а).

Суть проведення вимірювання  $P_{0ne}$  СНК аналогічний етапу 5 (рис. 4 б, етап 2).

По алгоритму, аналогічному етапу 3, виміряти  $P_{0ne}$  (дБмВт)\*, рівень сигналу визначений приладом SA, та розрахувати реальну ефективну чутливість приймача СНК урахуванням технічних можливостей підключеної відеокамери за формулою:

$$P_{0n}(\text{дБмВт}) = P_{1\sigma\text{-max}}(\text{дБмВт}) * - A_{xx_2}(\text{дБ}) + A_{wca}.$$

Внаслідок вимірювань на стадії етапу №1 (рис. 5а) та №2 (рис. 5б) вибрати найбільше значення  $P_{0ne}$ , тобто найгірший випадок.

*Етап 7: розроблений метод визначення максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FPV, параметр  $d_{0e\text{max}}$  (при застосуванні передавача БпЛА, приймача СНК та відеокамери відповідної моделі), як функція від частоти радіопередавача БпЛА-FPV, його максимальної реальної потужності; виду модуляції, від ширини спектру радіосигналу, швидкості передачі даних, згасання радіосигналу у вільному просторі, параметрів антено-фідерного тракту прийомо-передавачів БпЛА та СНК;*

$d_{0e\text{max}} = F(f_{tx}; P_{1\sigma\text{-max}}; \text{mod}; WCA; Ga_1; Ga_2; DFs; B; A_0; d_0; A_{xx_2})$ ; тип методу дослідження – теоретичний розрахунок, який базується на стандартах ІТУ. Згідно алгоритму вимірювань, етап а7), виконати розрахунок максимальної дальності польоту  $d_{0e\text{max}}$  для каналу радіолінії

FPV (з урахуванням технічних можливостей відеокамери) на основі рекомендацій ІТУ. Початковими даними є:

- частота радіосигналу передавача БпЛА  $f_{tx}$  (ГГц);
- максимальна реальна потужність передавача БпЛА  $P_{16-max}$  (дБмВт);
- вид модуляції;
- швидкість передачі інформації  $B$  (МБіт/с);
- задана необхідна проектована відстань польоту  $d_0$  (км) в режимі FPV;
- ефективна чутливість радіоприймача СНК з урахуванням відеокамери на борту БпЛА в режимі FPV  $P_{0ne}$  СНК (дБмВт);
- коефіцієнт підсилення антени СНК  $G_{a1}$ ;
- коефіцієнт підсилення антени БпЛА  $G_{a2}$ ;
- затухання WSA;
- затухання на джампері RC.

Далі, застосовуючи методику згідно [1, розділ – розрахункова частина], розрахувати  $d_{0e-max}$  при запасі на завмирання для пілотної місії не менше 6К 7 дБ; покроково, методом підбору, внаслідок розрахунків, знайти розрахункове значення  $d_{0e-max}$ . Розрахований параметр  $d_{0e-max}$  внести до паспорту радіолінії БпЛА в режимі FPV. Приклад розрахунку  $d_{0e-max}$  наведений в таблиці 1.

**Етап 8.** Згідно алгоритму, етап а8), розрахунок польотної карти БпЛА виконати по алгоритму представленому в [1]. Результати розрахунків для визначення польотної карти БпЛА, які виконані для інших значень відстані, представлені у таблиці 2 та у вигляді графіка / гістограми на рисунку 6. Всі розрахунки проведені з урахуванням середньостатистичного (за місяць, [12], [13]) затухання радіосигналу у водяній парі, в газах та в хмарах на найгірший випадок та за умови відсутності дощу та наявності “відкритого радіоінтервалу” між антенами СНК та БпЛА.

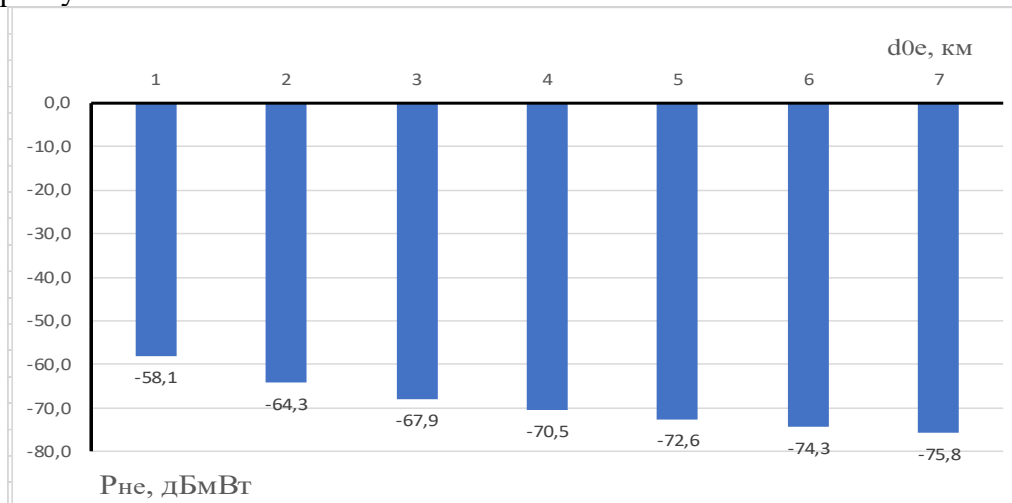


Рисунок 6 – Графік/гістограма польотної карти оператора БпЛА

Діаграма польотної місії по критерію залежність рівня радіосигналу на вході прийомо-передавача СНК  $P_{ne}$  (з урахуванням режиму FPV), як функція від відстані прямої візуальної видимості між СНК та БпЛА  $d_{0e}$ , представлена у таблиці 2. При цьому виконується умова “відкритої радіолінії” між СНК та БпЛА, тобто в зоні першого еліпсоїда Френеля відсутні об’єктні перешкоди (ліс, лісосмуги, лісосмуги вздовж доріг, будівлі тощо).

Таблиця 1 – Приклад розрахунку параметра  $d_{0e \max}$  з урахуванням відеокамери на борту БпЛА

№ з/п	Параметри		Примітка
	найменування	значення	
1.	Максимальна відстань між антенами СНК та БпЛА, $d_{0e \max}$ , м	7000	згідно <i>етапу 7</i> , визначено методом покрокового підбору
2.	Частота передавача БпЛА, ГГц	13,136	
3.	Ширина спектру радіосигналу, МГц	7,00	
4.	Вид модуляції	FSK	частотна маніпуляція
5.	Швидкість передачі, МБіт/с	8	дуплекс
6.	Частота приймача СНК, ГГц	13,136	
7.	Максимальна реальна потужність передавача БпЛА $P_{\text{об- max}}$ , дБмВт	20	визначено згідно <i>етапу 3</i>
8.	Ефективна реальна чутливість приймача СНК $P_{\text{не}}$ , дБмВт	-82,0	визначено згідно <i>етапу 6</i> при BER $\leq 10^{-6}$
9.	Коефіцієнт підсилення антени $G_{a_1}$ та $G_{a_2}$ , дБі	$20' 2 = 40$	
10.	Затухання джамперів РС (2 од.), дБ	$1,2' 2 = 2,4$	згідно [7] та <i>кроку 6</i>
11.	Затухання коаксіально-хвильових адаптерів WCA (2 од.), дБ	$0,4' 2 = 0,8$	згідно [2]
12.	Ширина першої зони Френеля, м	6,3219	в середина траси
13.	Довжина хвилі, см	2,28	
14.	Затухання у вільному просторі, дБ Rec. ITU-R P.525-3 [9]	131,713	без врахування затухань у газах, водній парі та хмарах ( $L_{bf}$ )
15.	Рівень сигналу на вході радіоприймача, дБм Rec. ITU-R P.341-7 [10]; Rec. ITU-R P.530-18 [11]	-74,913	за умови “відкритого радіоінтервалу”
16.	Енергетичний запас, дБ	7,087	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]	0,02	
18.	Затухання у повітрі, дБ/км Rec. ITU-R P.676-7 [12]	0,009	кисень, азот
19.	Сумарне затухання, дБ/км	0,029	водна пара + повітря
20.	Загальне затухання в парах води та повітря на всій трасі, дБ	0,203	водна пара + повітря
Розрахунок затухання в хмарах			
21.	Затухання в хмарах, дБ Rec. ITU-R P.840-9 [13].	0,6663	
22.	Узагальнений енергетичний запас (з урахуванням затухання в газах та в хмарах), дБ	6,2177	без врахування дощів
23.	Рівень сигналу на прийомі з урахуванням всіх складових;	-75,7823	рисунок 6, таблиця 2; дані для польотної карти до

№ з/п	Параметри		Примітка
	найменування	значення	
	контрольний розрахований рівень радіосигналу на прийомі СНК для польотної місії для відстані між БпЛА та СНК 7000м, дБмВт		паспорту радіолінії

Таблиця 2 – Результати розрахунку  $P_{ne}(d_{0e})$  для формування гистограми польотної карти оператора БпЛА

Відстань прямої візуальної видимості між СНК та БпЛА-FPV	$d_{0e}$	км	1	2	3	4	5	6	7
Рівень радіосигналу на вході радіоприймача СНК	$P_{ne}$	дБмВт	-58,1	-64,3	-67,9	-70,5	-72,6	-74,3	-75,8

Таблиця 2 та рисунок 6 відображають мінімально можливий рівень радіосигналу на вході СНК в залежності від відстані між СНК та БпЛА, та є основним орієнтиром для пілота БпЛА при виконанні польотної місії в режимі FPV в умовах подавлення ворогом загальної системи супутникової навігації. Дані орієнтири (таблиця 2) забезпечують політ БпЛА-FPV в умовах “відкритої радіолінії”, що в свою чергу забезпечує якість “картинки” FPV та мінімальну затримку потоку відеоданих між відеокамерою БпЛА та мікромонітором СНК при відслідковуванні ситуаційної обізнаності на полі бою в реальному часі.

*Етап 9.* Отримані дані (таблиця 2 та рисунок 6) занести в паспорт радіолінії БпЛА, який розроблений в [2].

На рисунку 7 представлена блок-схема розробленої методики визначення максимальної дальності польоту  $d_{0e\max}$  БпЛА-FPV при використанні радіолінії зв'язку, діапазону частот 7К 38 ГГц, в лабораторних умовах, коли задіяні портативні вимірювальні пристрої.

**Висновок.** В статті розглянуті концептуальні питання деталізованої процедури вимірювання в лабораторних умовах параметрів прийомо-передавачів БпЛА, СНК та радіолінії зв'язку між ними в режимі FPV для діапазону частот 7К 38 ГГц, розроблені методи виконання вимірювань та розрахунків, результатом яких є синтез методики визначення максимально-можливої дальності польоту БпЛА в режимі FPV при використанні радіолінії передачі даних в лабораторних умовах для заданих конкретних типів прийомо-передавачів та моделей відеокамер.

Виконаний приклад розрахунків максимальної дальності польоту та розрахована “польотна карта” для прийомо-передавачів CFM-13-LM виробництва SAF Tehnika, м. Рига, Латвія, діапазону частот 13 ГГц, для випадку заданої фіксованої частоти. Виконаний розрахунок максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FPV для конкретного випадку в діапазоні частот 12,75-13,25 ГГц, який трансформується в “польотну карту” для внесення в паспорт радіолінії.

Синтезовану методику доцільно застосовувати для експериментального дослідження прийомо-передавачів БпЛА наступних діапазонів: L-band (1,0 ГГц – 2,0 ГГц); S-band (2,0 ГГц – 4,0 ГГц); C-band (4,0 ГГц – 8,0 ГГц); X-band (8,0 ГГц – 12,0 ГГц); Ku-band (12,0 ГГц – 18,0 ГГц); K-band (18,0 ГГц – 26,5 ГГц); Ka-band (26,5 ГГц – 40,0 ГГц).

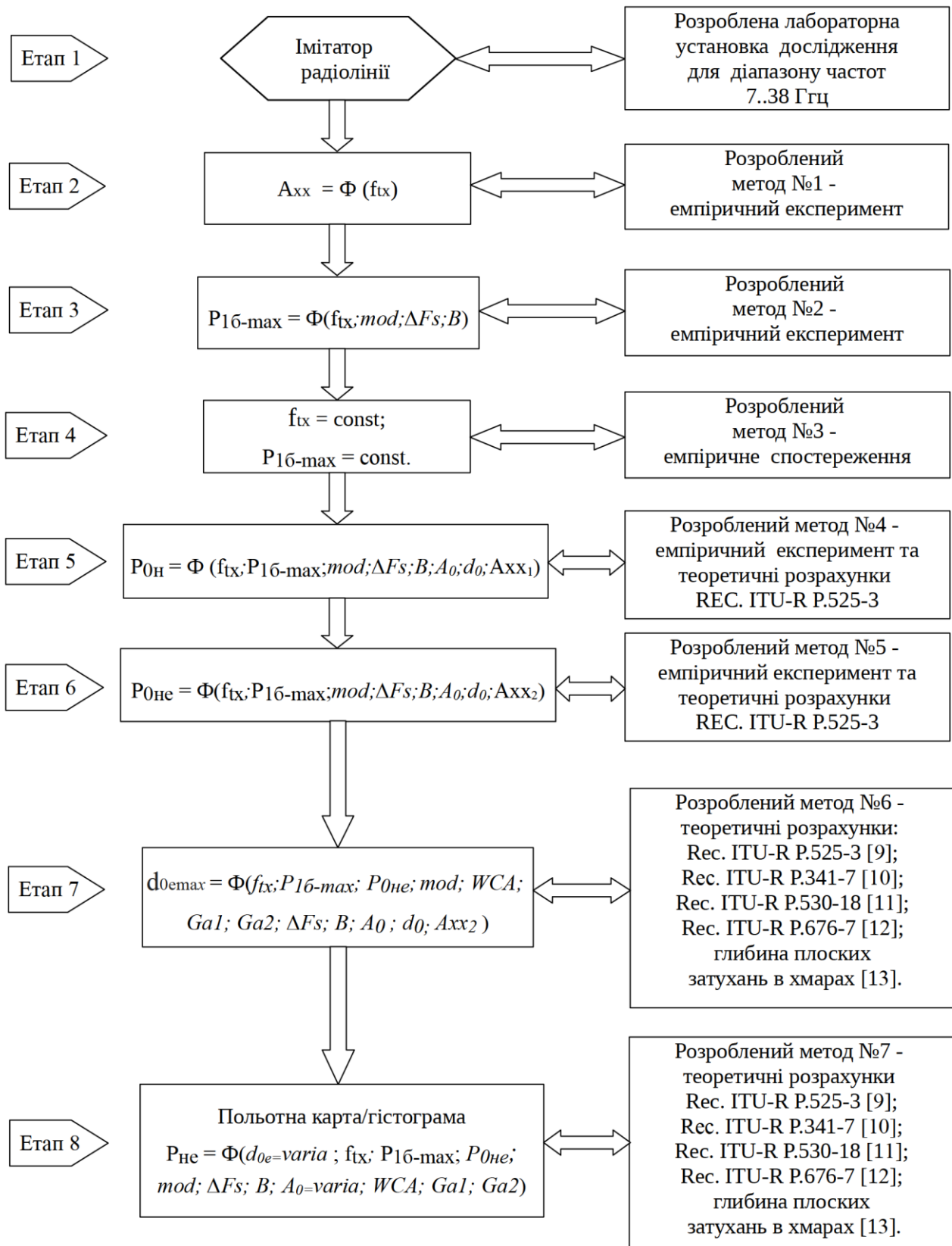


Рисунок 7 – Блок-схема методики визначення  $d_{0e-max}$  БПЛА-FPV при використанні радіолінії зв'язку, діапазону частот 7К 38 ГГц, в лабораторних умовах

Також розроблену методику доцільно застосовувати для технічного обслуговування та контролю параметрів приймачів-передавачів БПЛА та СНК відповідними регламентними підрозділами Сил безпілотних систем ЗС України в польових умовах з обов'язковою фіксацією отриманих даних в паспортах радіолінії передачі даних БПАК.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] O. Saliy, V. Hol, A. Divitskyi, and O. Khakhlyuk, "A complete solution for anti-jaming radio data-link of an unmanned aerial vehicle", *Information Technology and Security*, vol. 11, iss. 2 (21), pp. 251-264, 2023. doi: <http://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939>.
- [2] O. Saliy, S. Vasylenko, Y. Zinchenko, and O. Khakhlyuk, "Algorithm for measuring parameters of radio link of an unmanned aircraft in FPV mode of the centimetre frequency range", *Information Technology and Security*, vol. 12, iss. 1 (22), pp.135-146, 2024. doi: <http://doi.org/10.20535/2411-1031.2024.12.1.306279>.
- [3] C.A.L. Diakhate, *Propagation channel modeling at centimeter-and-millimeter-wave frequencies in 5G urban micro-cellular context. Networking and Internet Architecture*. Paris, France: Université Paris Saclay, 2019. [Online]. Available: <https://pastel.hal.science/tel-02133961>. Submitted on 20 May 2019. p. 236. Accessed on: June 5, 2024.
- [4] F.D. Diba et al., "Centimeter and mm-wave propagation characteristics for indoor corridors", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158726-158737, 2021. doi: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130293>.
- [5] M.A. Samad et al., "Analysis of centimeter and millimeter-wave path loss at emergency exit", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1-11, 2023. doi: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264648>.
- [6] G. Durgin, T.S. Rappaport, and H. Xu, "Measurements and models for radio path loss and penetration loss in and Around Homes and Trees at 5.85 GHz", *IEEE Xplore, IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, pp. 1484-1496, no. 11, 1998. doi: <http://doi.org/10.1109/26.729393>.
- [7] "SAC-40G low-loss, high-frequency RF cable for high frequency testing up to 40 GHz", *A.H. Systems, Inc.* [Online]. Available: <https://www.AHSystems.com>. Accessed on: June 10, 2024.
- [8] "Spectrum Compact v2 0,01-43 GHz. User Manual", *SAF.* [Online]. Available: <https://spectrumcompact.com/downloads/#user-manuals>. Accessed on: June 14, 2024.
- [9] "ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2016. Recommendation P.525-3 (09/2016). Calculation of free-space attenuation", *ITU.* [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-3-201611-S/en>. Accessed on: June 17, 2024.
- [10] "ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2019. Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links", *ITU.* [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.341-7-201908-I/en>. Accessed on: June 19, 2024.
- [11] "ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2021. Recommendation ITU-R P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems", *ITU.* [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-18-202109-I/en>. Accessed on: June 21, 2024.
- [12] ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2007. Recommendation ITU-R P.676-7. Attenuation by atmospheric gases", *ITU.* [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-7-200702-S/en>. Accessed on: June 25, 2024.

- [13] “ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2023. Recommendation ITU-R P.840-9 (08/2023). Attenuation due to clouds and fog”, *ITU*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840-9-202308-I/en>.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2024.

## REFERENCE

- [1] O. Saliy, V. Hol, A. Divitskyi, and O. Khakhlyuk, “A complete solution for anti-jaming radio data-link of an unmanned aerial vehicle”, *Information Technology and Security*, vol. 11, iss. 2 (21), pp. 251-264, 2023. doi: <http://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939>.
- [2] O. Saliy, S. Vasylenko, Y. Zinchenko, and O. Khakhlyuk, “Algorithm for measuring parameters of radio link of an unmanned aircraft in FPV mode of the centimetre frequency range”, *Information Technology and Security*, vol. 12, iss. 1 (22), pp.135-146, 2024. doi: <http://doi.org/10.20535/2411-1031.2024.12.1.306279>.
- [3] C.A.L. Diakhate, *Propagation channel modeling at centimeter–and–millimeter–wave frequencies in 5G urban micro–cellular context. Networking and Internet Architecture*. Paris, France: Université Paris Saclay, 2019. [Online]. Available: <https://pastel.hal.science/tel-02133961>. Submitted on 20 May 2019. p. 236. Accessed on: June 5, 2024.
- [4] F.D. Diba et al., “Centimeter and mm-wave propagation characteristics for indoor corridors”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158726-158737, 2021. doi: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130293>.
- [5] M.A. Samad et al., “Analysis of centimeter and millimeter-wave path loss at emergency exit”, *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1-11, 2023. doi: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264648>.
- [6] G. Durgin, T.S. Rappaport, and H. Xu, “Measurements and models for radio path loss and penetration loss in and Around Homes and Trees at 5.85 GHz”, *IEEE Xplore, EEE Transactions on Communications*, vol. 46, pp. 1484-1496, no. 11, 1998. doi: <http://doi.org/10.1109/26.729393>.
- [7] “SAC-40G low-loss, high-frequency RF cable for high frequency testing up to 40 GHz”, *A.H. Systems, Inc.* [Online]. Available: <https://www.AHSystems.com>. Accessed on: June 10, 2024.
- [8] “Spectrum Compact v2 0,01-43 GHz. User Manual”, *SAF*. [Online]. Available: <https://spectrumcompact.com/downloads/#user-manuals>. Accessed on: June 14, 2024.
- [9] “ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2016. Recommendation P.525-3 (09/2016). Calculation of free-space attenuation”, *ITU*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-3-201611-S/en>. Accessed on: June 17, 2024.
- [10] “ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2019. Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links”, *ITU*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.341-7-201908-I/en>. Accessed on: June 19, 2024.
- [11] “ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2021. Recommendation ITU-R P.530-18 (09/2021). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”, *ITU*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-18-202109-I/en>. Accessed on: June 21, 2024.
- [12] ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2007. Recommendation ITU-R P.676-7. Attenuation by atmospheric gases”, *ITU*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-7-200702-S/en>. Accessed on: June 25, 2024.



- [13] “ITU-R Recommendations. P Series. Radiowave propagation. ITU 2023. Recommendation ITU-R P.840-9 (08/2023). Attenuation due to clouds and fog”, *ITU*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840-9-202308-I/en>.

OLEKSANDR SALIY,  
VLADYSLAV HOL

## **METHOD OF DETERMINING THE MAXIMUM FLIGHT RANGE OF A UAV USING THE FPV MODE AND USING THE CENTIMETER FREQUENCY RANGE OF RADIO-LINK IN LABORATORY CONDITIONS**

At the current stage of production of various unmanned aerial vehicles (UAVs) in the flight mode “first person view” (FPV), there are no individual passports with information on the maximum possible flight range for individual UAV-FPV kits and ground control stations (GSC) application of a suitable model of a digital video camera (including a thermal imaging camera) and the use of a radio line of communication in the centimeter frequency range.

Therefore, the main goal of the article is the selection and development of methods for measuring the main parameters of the receiver-transmitter of UAVs and GSC in laboratory conditions in the combat zone, using the developed “simulator of the radio communication line of data transmission”; with further calculation, on the basis of relevant international standards, of the maximum possible flight range and drawing up the corresponding “flight map”.

The main results of the article are: the method of determining the maximum possible flight range of UAVs in FPV mode in laboratory conditions for the frequency range of 7K 38 GHz has been developed, which is based on a set of developed experimental and empirical measurement methods and theoretical calculation methods, according to the recommendations of the ITU (International Telecommunication Union).

The materials of the article are of practical value for the planning and organization of the flight mission of multi-rotor UAVs of the tactical level for a given distance, as well as for the activities of the UAV routine maintenance units of the Unmanned Systems Forces of the Armed Forces of Ukraine upon the fact that UAVs return from flight missions in order to check their technical parameters.

**Keywords:** UAV, FPV, data-link, radio line simulator of the centimeter frequency range, laboratory installation, maximum flight range of UAV in FPV mode.

**Салій Олександр Сергійович**, молодший науковий співробітник 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, [os.telcom2024@gmail.com](mailto: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, [vlad-gol@ukr.net](mailto:vlad-gol@ukr.net).

**Salii Oleksandr**, research assistant of the Research center, Institute of special communications and information projection of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Hol Vladyslav**, candidate of technical sciences, professor, head of special academic department No.1, Institute of special communications and information protection of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.