

DOI 10.20535/2411-1031.2024.12.1.306279

УДК 621.396

ОЛЕКСАНДР САЛІЙ,
СЕРГІЙ ВАСИЛЕНКО,
ЯРОСЛАВ ЗІНЧЕНКО,
ОЛЕКСІЙ ХАХЛЮК

АЛГОРИТМ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ В РЕЖИМІ FPV

Анотація. Масове застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в режимі віддаленого управління «від першої особи» (First Person View, FPV) у бойових діях кардинально змінює картину сучасної війни. Їх застосування дає можливість завдати шкоди або знищити ворожу техніку, вартість якої у сотні разів перевищує вартість БпЛА.

Для успішного виконання польотної місії БпЛА в режимі FPV, необхідно забезпечити стійкий радіозв'язок БпЛА зі станцією наземного керування (СНК). У роботі для організації радіолінії між СНК та БпЛА, пропонується використовувати радіолінії сантиметрового діапазону частот.

При цьому на етапі планування польотної місії оператора БпЛА, для розрахунку максимальної дальності польоту необхідно мати інформацію про параметри прийомопередавальних пристроїв безпілотного авіаційного комплексу (БпАК).

Метою роботи є розробка алгоритму вимірювання параметрів радіолінії зв'язку безпілотного літального апарату в режимі FPV сантиметрового діапазону частот. Використання даних відомостей дозволить оператору БпАК створити карту польоту та підготуватися до виконання бойового завдання.

Матеріал викладений у статті містить практичну цінність для операторів БпАК та може бути використаний при організації та плануванні польотної місії мультироторних БпЛА тактичного рівня на задану відстань. Також матеріал може бути використаний підрозділами обслуговування БпЛА з метою перевірки технічних параметрів радіолінії між БпЛА та СНК та оптичних систем встановлених на борту БпЛА (відеокамер, тепловізійних камер тощо).

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

Постановка проблеми. Відповідно до Доктрини Застосування безпілотних систем у силах оборони України ОП 3-0(46) від 01.01.20204 безпілотні авіаційні системи (БпАС) повинні:

- максимально реалізовувати свої бойові можливості;
- забезпечувати живучість безпілотних систем;
- забезпечувати взаємодію та узгодженість застосування бойових підрозділів.

Досвід ведення бойових дій показав, що сучасні БпЛА, які працюють в режимі FPV, здатні, як самостійні бойові одиниці, виконувати завдання:

- розвідки та корегування вогню мінометів і артилерії;
- скиду боєприпасів з необхідної висоти баражування (зависання) з точністю $\pm 0,5\text{ м}$;
- вогневого ураження об'єктів шляхом безпосереднього влучання БпЛА начиненого вибухівкою з точністю $\pm 0,2\text{ м}$.

Для успішного виконання польотної місії до радіолінії зв'язку між БпЛА та станцією наземного керування (СНК) повинні висуватися наступні вимоги:

- якісний канал передачі потокового відео в режимі реального часу з борта БпЛА на СНК (швидкість передачі $B = 1,2 \dots 14$ Мбіт/с, затримка $t_{\text{затр}} < 60$ мс);
- робочий діапазон частот повинен забезпечувати захист від засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) противника;
- застосування вузькосмугових сигналів ($\Delta F = 1 \dots 7$ МГц) для ускладнення роботи засобів радіотехнічної розвідки (РТР) противника.

Аналіз сучасних цивільних БпЛА з режимом FPV, що масово застосовуються для виконання бойових завдань, показав відсутність можливості протистояти «окопним РЕБ» противника, які як правило працюють в діапазоні частот $0,1 \dots 6$ ГГц, та впливу ворожих радіолокаційних станцій (РЛС), які працюють у діапазоні частот $2,0 \dots 18$ ГГц [1].

Для вирішення зазначеної проблеми доцільно застосувати принцип «штучного розширення спектру», шляхом збільшення кількості задіяних частот роєм БпЛА тактичного застосування, які повинні одночасно працювати в широкому діапазоні частот від $1,0$ ГГц до 38 ГГц.

Тому у роботі для організації радіолінії між СНК та БпЛА, пропонується використовувати радіолінії сантиметрового діапазону частот згідно [6, таблиця 4]: 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 – $27,0$ ГГц); Ka-band ($27,0$ ГГц – $40,0$ ГГц).

При цьому для якісного планування польотної місії оператору БпЛА необхідно мати алгоритм розрахунку дальності польоту та інформацію про реальні технічні параметри прийомо-передавального обладнання та параметри оптичних систем БпЛА.

На жаль більшість сучасних БпЛА мультироторного типу, що використовуються для виконання бойових завдань тактичного рівня, не мають регламентованих паспортів із зазначенням таких точних технічних параметрів та потребують дослідження в лабораторних (польових) умовах для їх визначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій проведений у [2]–[5] показав, що дослідження розповсюдження радіохвиль сантиметрового діапазону частот з використанням вимірювальних приладів в лабораторних умовах не враховує особливості застосування вимірювальних приладів для визначення характеристик прийомо-передавальних пристроїв сантиметрового діапазону в польових умовах. Також у роботах [2]–[5] відсутній алгоритм визначення максимальної довжини польотної траси на відстань більше ніж 2000 м та не враховуються особливості розповсюдження радіохвиль в умовах за межами міської забудови.

Метою роботи є розробка алгоритму вимірювання параметрів радіолінії зв'язку безпілотного літального апарату в режимі FPV сантиметрового діапазону частот в лабораторних умовах із застосуванням портативного польового спектроаналізатора.

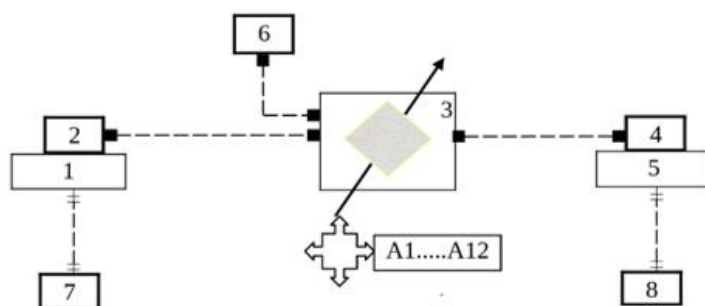
Постановка задачі. Використання приймально-передавальних пристроїв сантиметрового діапазону частот, поряд з перевагами уникнення впливу засобів РЕБ противника, висуває ряд вимог, до яких відносять:

- необхідність забезпечення польоту в умовах «відкритого радіо-інтервалу» під час всієї польотної місії (коли коефіцієнт бітових помилок (Bit Error Ratio, BER) $< 10^{-6}$);
- використання направлених антенних систем з діаграмою спрямованості (ДС) з шириною основного пелюстка $9^\circ \dots 30^\circ$ та придушенням активних завад по боковим та заднім пелюсткам ДС > 20 дБ);
- віддалений контроль завадової обстановки на борту БпЛА в реальному часі (затримка < 60 мс);
- віддалений контроль рівня сигналу на вході приймача БпЛА та якості каналу зв'язку по критерію BER (елемент першого рівня аналізу обізнаності для реалізації елементів штучного інтелекту).

Враховуючи вище викладене для якісного виконання бойового завдання оператор БпЛА на етапі планування польотної місії повинен мати реальну інформацію про:

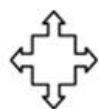
- чутливість приймача СНК (P_{0e});
- чутливість приймача на борту БпЛА (P_0);
- максимальну вихідну потужність радіопередавача (P_1);
- максимально допустиму відстань польоту при збереженні якісного зображення в режимі FPV за відсутності дощу, туману тощо (d_0);
- максимально допустиму відстань польоту при збереженні якісного зображення в режимі FPV за наявності складних погодних умов (d_{0r});
- залежність рівня сигналу на вході СНК від відстані на якій знаходиться БпЛА («діаграма польоту»);
- параметри сумісності оптичної системи, встановленої на борту БпЛА, із трактом прийомо-передавача БпЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі з метою визначення параметрів радіолінії зв'язку БпЛА в режимі FPV сантиметрового діапазону частот запропоновано замість натурних випробувань, що можуть спричинити поломку чи втрату БпЛА, всі дослідження здійснювати у лабораторних умовах з використанням «Імітатора радіолінії БпЛА в режимі FPV» (рис. 1).



де

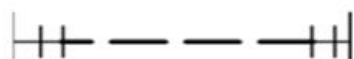
- | | |
|---|--|
| 1 – прийомо-передавач СНК; | 6 – портативний спектроаналізатор для вимірювання потужності спектру радіосигналу, заданої частоти при заданій модуляції, ширині спектру сигналу (SA); |
| 2 – коаксіально-хвильовий перехід прийомо-передавача СНК (WCA); | 7 – автоматизована система; |
| 3 – набір атенюаторів $A_1 \dots A_{12}$; | 8 – відео-камера (тепловізор) БпЛА. |
| 4 – коаксіально-хвильовий перехід прийомо-передавача БпЛА; | |
| 5 – прийомо-передавач БпЛА; | |



набір радіочастотних атенюаторів з різною градацією затухання A_{xx} ;



радіочастотний джампер в діапазоні частот 0.....40 ГГц;



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

Рисунок 1 – Структурна схема лабораторної установки «Імітатор радіолінії БпЛА в режимі FPV»

Засоби виміральної техніки та інше обладнання, що використовувалося для проведення вимірювань, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Перелік засобів вимірювальної техніки та інше обладнання, що використовувалося для проведення вимірювань

№ п/п	Абревіатура/ скорочене позначення на схемах	Функціонал застосування приладу/обладнання/ аксесуару	Тип/ виробник	Модель/частотний діапазон, ГГц	Кількість, штук
1	SA (Spectrum Analyser-аналізатор спектру)	Вимірювач рівня радіосигналу в заданому спектрі частот при заданій частоті/ на базі портативного аналізатора спектра	Spectrum Compact J0SSAPxx/ SAF Tehnika, Латвія [11]	J0SSAP31/0,1-3 ГГц; J0SSAP33/0,3-3 ГГц; J0SSAP55/2,0-8,0 ГГц; J0SSAP12/10,0-18,0 ГГц; J0SSAP52/6,0-20,0 ГГц; J0SSAP53/16,0-26,5 ГГц; J0SSAP74/24,0-40,0 ГГц; J0SSAP61/51,0-71,0 ГГц	1 1 1 1 1 1
2	SG (Signal Generator-генератор радіосигналу)	Для тестування прецизійних атенуаторів радіочастот в заданому спектрі частот	SG Compact J0SSAGxx/ SAF Tehnika Латвія [11]	J0SSAP11/5,95-12,0; J0SSAP12/10,0-18,0; J0SSAP13/17,0-24,3; J0SSAP14/24,0-40,0	1 1 1 1
3	A	Комплект фіксованих атенуаторів 1 - 40дБ, 0...40,0 ГГц (JX-AT-DC40G-хdB, Coaxial Attenuator); для імітації затухання радіосигналу при розповсюдженні радіохвиль у вільному просторі (ідеалізована модель радіолінії)	Axx Виробник Jing Xin Technology, Китай [12]	A1:JX-AT-DC40G-1dB; A2:JX-AT-DC40G-2dB; A3:JX-AT-DC40G-3dB; A4:JX-AT-DC40G-4dB; A5:JX-AT-DC40G-5dB; A6:JX-AT-DC40G-6dB; A10:JX-AT-DC40G-10dB; A20:JX-AT-DC40G-20dB; A30:JX-AT-DC40G-30dB; A40:JX-AT-DC40G-40dB;	1 1 1 1 1 1 2 2 4 4
4	BM	BER-тестер, вимірювач коефіцієнта помилок (bit to error)	SAF Tehnika	Вбудований тестер в приймач БпЛІА та СНК	2
5	RC	Radio frequency cable testing – радіочастотний кабель для тестування/джампер/0...40 ГГц	SAC-40G-xx, A.H. Systems, Inc [8]	SAC-40G-0,5 (High-Frequency, Low-Loss RF Cables; довжина джамперу 0,5м)	4
6	WCA	Waveguide-coaxial adapter – коаксіально-хвильовий адаптер	Grante, Угорщина. на всі діапазони (insertion loss) 0,4 дБ [13]	R84, 7/8 ГГц; R100, 10/11 ГГц; R140, 13/15 ГГц; R220, 18/23 ГГц; R260, 26/28 ГГц; R320, 30/38 ГГц;	2 2 2 2 2
7	TE	Test equipment – комплект імітатора радіолінії передачі даних у вільному просторі у складі: WCA 2 шт.; A40 2 шт , 40дБ; -RC 40 см , 1 шт	Test suite equipment XX GHz. SAF Tehnika, Латвія; комплект [7]	C08TST02, 7/8 ГГц; C11TST02, 10/11 ГГц; C15TST02, 13/15 ГГц; C22TST02, 18/23 ГГц; C26TST02, 24/26 ГГц; C38TST02, 30/38 ГГц;	1 1 1 1 1 1

Примітка: таблиця складена на основі аналізу пошукових сайтів мережі Інтернет у вільному доступі

Запропонований імітатор радіолінії складається з блоків прийомо-передавачів 1 та 5, які мають вбудовані системи аналізу заводової обстановки (по критерію BER на прийомі) та характеру розповсюдження радіохвиль (по критерію рівня радіосигналу на прийомі P_2 , у дБмВт) і IP-інтерфейс у вигляді маршрутизатора. Обидва прийомо-передавачі мають коаксіально-хвильові переходи 2 та 4 відповідно, які дозволяють їх з'єднати за допомогою

радіочастотного джампера в діапазоні частот $0...40\text{ГГц}$ та підключити радіочастотні атенюатори з різною градацією затування, що імітують дальність радіолінії. Також до прийомо-передавачів 1 та 5 підключаються: на стороні СНК – автоматизована система (ноутбук), яка здійснює відтворення потокового відео; на стороні БпЛА – відеокамера.

Принцип роботи запропонованого імітатора полягає у наступному. Потокове відео з камери FPV-дрона через маршрутизатор за допомогою витої пари по інтерфейсу RJ-45 (Ethernet) підключається до прийомо-передавача БпЛА. Коаксіально-хвильовий перехід прийомо-передавача БпЛА виконує функцію перетворення радіохвилі в заданому діапазоні частот для проходження радіо-сигналу по радіочастотному джамперу на вхід «імітатора радіолінії» 3. Імітатор радіолінії 3 з набором відповідних атенюаторів $A_1..A_{12}$ імітує затування радіосигналу при розповсюдженні радіохвиль в приземному тропосферному середовищі відповідно від розрахованої дальності зв'язку між НСК та БпЛА у вільному просторі з урахуванням затування радіосигналу в парах води та в сухому повітрі. На приймальній стороні за допомогою маршрутизатора витою парою по інтерфейсу RJ-45 (Ethernet) підключається автоматизована система 7, за допомогою якої контролюється якість відео отриманого з відеокамери в реальному часі.

Для вимірювання параметрів радіолінії використовується портативний аналізатор спектру (SA), що дозволяє визначити з необхідною точністю значення:

- чутливості приймача СНК на заданій частоті прийому з урахуванням реальних параметрів оптичної системи відеокамери $\delta (P_{0\text{не}})$;
- чутливість приймача на борту БпЛА ($P_{0\text{б}}$);
- максимальну вихідну потужність радіопередавача БпЛА на заданій частоті передачі ($P_{1\text{бmax}}$).

Отримані експериментальні дані дозволять провести розрахунок максимально допустимої відстані польоту БпЛА ($d_{0\text{max}}$) та скласти «діаграму польоту» БпЛА до моменту виконання бойового завдання.

Для виконання розрахунків використовуються моделі, що імітують розповсюдження сигналу у вільному просторі із затуванням 40 та 80 дБ (рис. 2-3) або додаткові атенюатори $A_{\text{хх}}$ згідно з таблицею 1.



Рисунок 2 – Модель імітатора радіолінії передачі даних у вільному просторі при сумарному затуванні радіохвилі 40 дБ

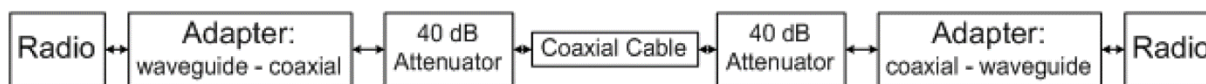


Рисунок 3 – Модель імітатора радіолінії передачі даних у вільному просторі при сумарному затуванні радіохвилі 80 дБ

Приклад лабораторного імітатора радіолінії із затуванням у вільному просторі 80 дБ для прийомо-передавачів CFM ODU виробництва SAF Tehnika [7] представлений на рис. 4.

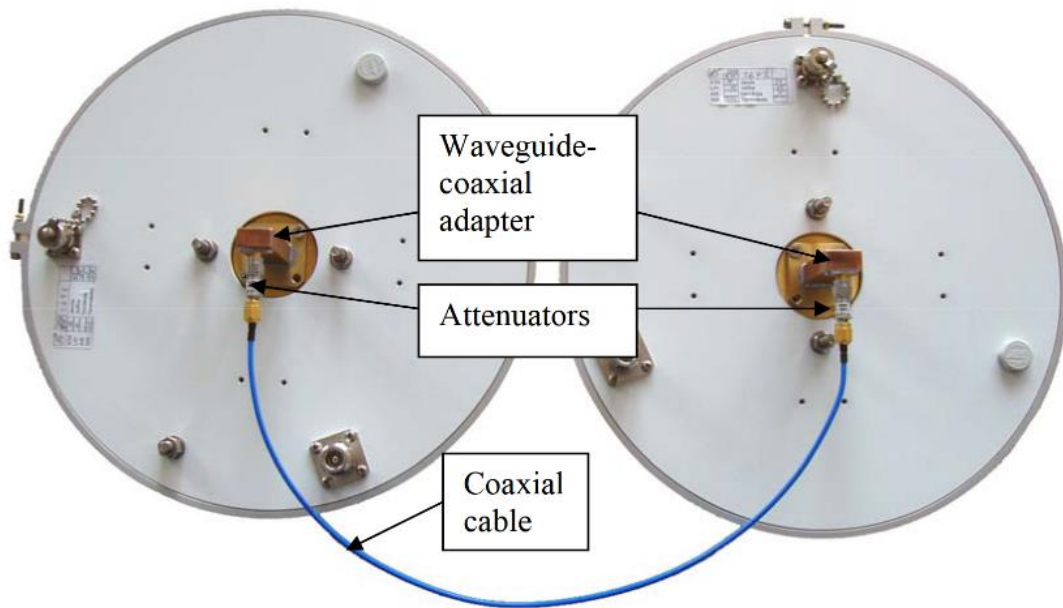


Рисунок 4 – Приклад лабораторного імітатора радіолінії із затуханням у вільному просторі 80 дБ для прийомо-передавачів CFM ODU для БпЛА та СНК

При цьому за допомогою набору атенюаторів А параметр затухання можна змінювати від 10 до 180 дБ у діапазоні частот радіохвиль від 0,3 до 40 ГГц.

Приклад тестового комплекту для імітації затухання 80 дБ для діапазону частот 13/15 ГГц, у складі WCA (коаксіально-хвильовий адаптер), А40 (атенюатор JX-AT-DC40G-40dB), RC (джампер), представлений на рис. 5.

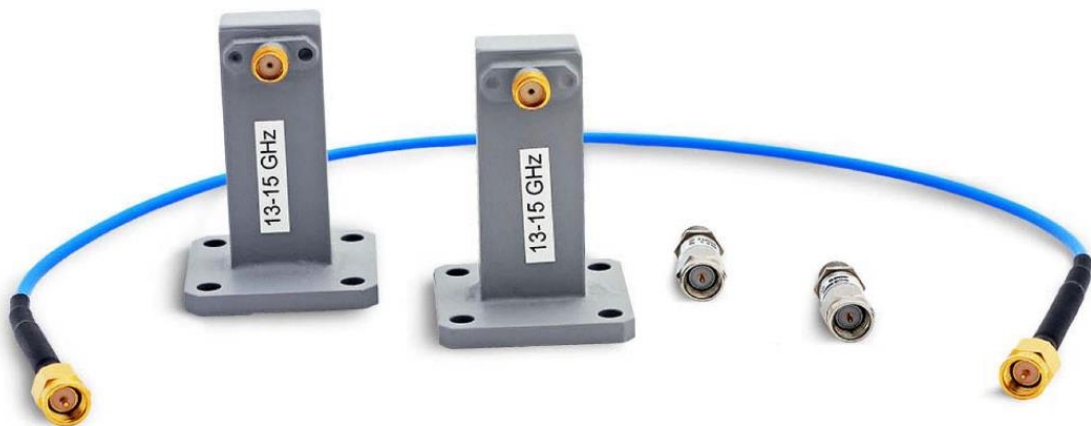


Рисунок 5 – Приклад тестового комплекту імітатора радіолінії для 13/15 ГГц із затуханням у вільному просторі 80дБ

На рисунках 6а) та 6б) відповідно представлений зовнішній вигляд портативного генератора SG [9] та портативного спектроаналізатора SA [10].



Рисунок 6а) – Зовнішній вигляд портативного генератора SG (згідно з таблицею 1)



Рисунок 6б) – Зовнішній вигляд портативного спектроаналізатора SA (згідно з таблицею 1)

Лабораторна установка імітатора радіолінії передачі даних для дослідження максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FPV на основі прийомо-передавачів CFM-13-LM у діапазоні 13 ГГц представлена на рисунку 7.

Запропонований «імітатор радіолінії БпЛА» в режимі FPV дозволяє:

- проводити дослідження параметрів прийомо-передавачів БпЛА;
- проводити дослідження параметрів оптичних систем встановлених на борту БпЛА (відеокамер, тепловізійних камер тощо).

Необхідно відмітити, що дослідження параметрів прийомо-передавачів БпЛА та СНК можуть проводитися як на вже існуючих БпЛА, так і на етапі проектування та розробки нових.

За результатами досліджень створено паспорт радіолінії передачі даних БпЛА в режимі FPV на основі прийомо-передавачів CFM-13-LM в діапазоні 13 ГГц (табл. 2).

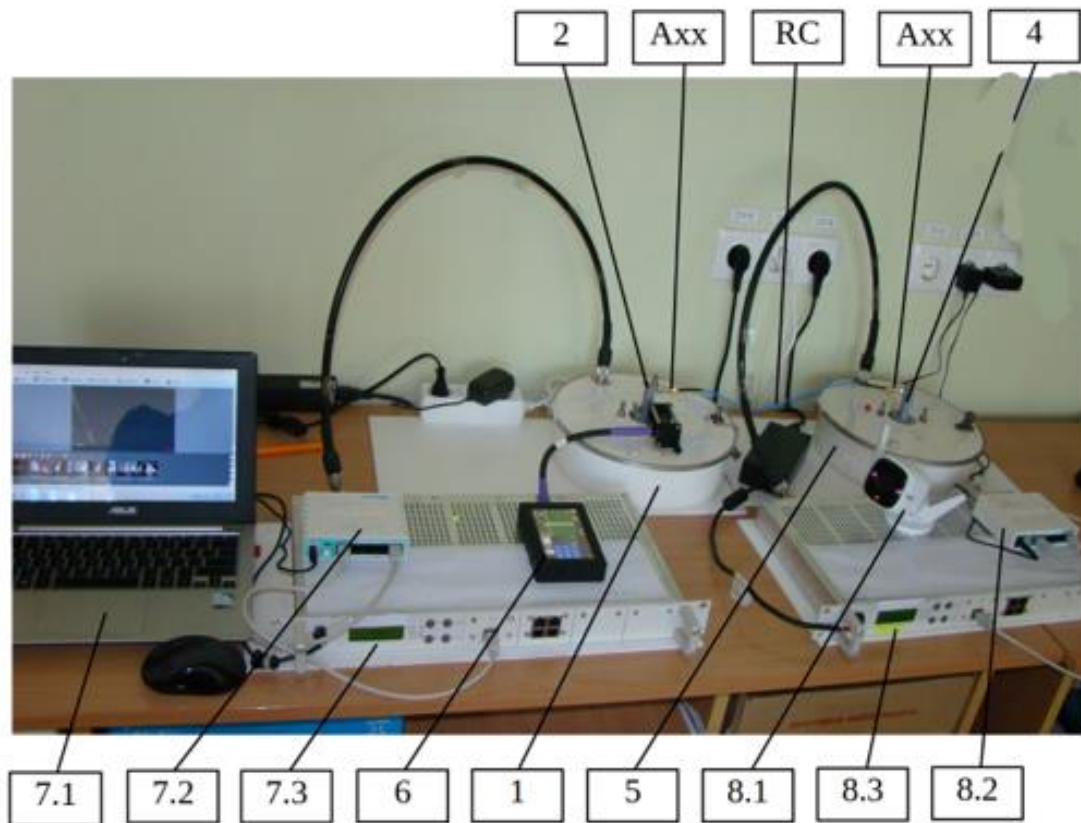
Алгоритм вимірювання параметрів радіолінії зв'язку БпЛА в режимі FPV в діапазоні частот 2...38 ГГц. На основі проведених досліджень відпрацьований алгоритм вимірювання параметрів радіолінії зв'язку між БпЛА та СНК в лабораторних польових умовах, що містить наступні кроки:

1) монтаж-складання «імітатора радіолінії» згідно структурної схеми, задіяних портативних вимірювальних приладів, антенно-фідерних пристроїв, радіочастотних атенуаторів та джамперів;

2) вимірювання рівня затухання еталонних атенуаторів, які задіяні в імітаторі радіолінії на заданій радіочастоті;

3) вимірювання максимальної потужності передавача $P_{16\max}$ БпЛА при заданій частоті радіопередачі, відомому виді модуляції, швидкості передачі інформації та перевірка стабільності його роботи;

4) аналіз стабільності частоти f_{tx} передавача БпЛА, при визначеній максимальній реальній потужності передавача БпЛА $P_{16\max}$, відомому виді модуляції та швидкості передачі інформації;



де

- 1 – прийомо-передавач СНК CFM-13-LM, згідно рисунка 1;
- 2 – коаксіально-хвильовий перехід прийомо-передавача СНК згідно рисунка 1 (позиція 6 – WCA згідно з таблицею 1);
- 4 – коаксіально-хвильовий перехід прийомо-передавача БпЛА згідно рисунка 1 (позиція 6 – WCA згідно з таблицею 1);
- 5 – прийомо-передавач БпЛА CFM-13-LM, згідно рисунка 1;
- 6 – портативний тактичний спектроаналізатор, для замірів рівня радіосигналу та стабільності частоти, згідно рисунка 1 (позиція 1 – SA згідно з таблицею 1);
- 7.1 – ноутбук у складі автоматизованої системи;
- 7.2 – пілотний контролер СНК з IP-Ethernet інтерфейсом RJ-45;
- 7.3 – модем CFM-13-LM СНК з вбудованою системою аналізу якості зв'язку по критерію BER та телеметрії прийомо-передавача;
- Axx – комплект атенюаторів (позиція 3 згідно з таблицею 1);
- RC – радіочастотний кабель/джампер (позиція 5 згідно з таблицею 1);
- 8.1 – відеокамера (тепловізор) у складі БпЛА;
- 8.2 – пілотний контролер БпЛА з IP-Ethernet інтерфейсом RJ-45;
- 8.3 – модем CFM-13-LM БпЛА з вбудованою системою аналізу якості зв'язку по критерію BER та телеметрії прийомо-передавача.

Рисунок 7 – Приклад лабораторної установки імітатора радіолінії передачі даних для дослідження максимальної дальності польоту БпЛА в режимі FPV на основі прийомо-передавачів CFM-13-LM

Таблиця 2 – Паспорт радіолінії передачі даних БпАК в режимі FPV на основі прийомо-передавачів CFM-13-LM у діапазоні 13 ГГц

№ з/п	Найменування параметру	Тип	PN	S/N	Рік випуску	Кількість реклаमाцій,
1.	Прийомо-передавач	CFM-LM	xxxxxxxx	xxxxxxx	2018	відсутня
	Діапазон частот/піддіапазон	12.75- 13.25 ГГц				
	Дуплекс	266 МГц				
	Ширина спектру радіосигналу (ΔF_s)	8 МГц				
	Вид модуляції	4FSK				
	Кількість підканалів	16 (опціонально 24)				
	Частота передавача (f_{tx})	12870 МГц				
	Частота приймача (f_{rx})	13136 МГц				
	Вихідна потужність передавача максимальна (P_{bmax})	20 дБмВт				
	Чутливість приймача в режимі FPV (P_{0nc})	- 82 дБмВт (BER=10 ⁻⁶)				
	Швидкість передачі/прийому відеопотоку даних (B)	8 МБіт/с (дуплекс)				
	Затримка відеопотоку даних на максимальній відстані	40 мс				
	Коефіцієнт підсилення антени (G_a) Gain, дБі	20				
	Ширина діаграми спрямованості ДДСА (Beamwidht), °	15,9 (E-plane) 16,3 (H-plane)				
	Максимальна дальність польоту в режимі FPV, км	7 (для «відкритої радіолінії» без опадів та туману)				
2.	Відеокамера	Таро С310 EV	xxxxxxxx	xxxxxxx	2018	відсутня

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

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

7) розрахунок максимальної дальності польоту $d_{0e_{max}}$ для каналу радіолінії FPV (з урахуванням технічних можливостей відеокамери) на основі рекомендацій ITU (International Telecommunication Union; Міжнародний Союз Електрозв'язку – МСЕ);

8) розрахунок польотної картки БпАК;

9) внесення отриманих результатів вимірювань у розроблений паспорт радіолінії передачі даних БпАК (таблиця 2).

Висновок. В статті розглянуті концептуальні питання процедури вимірювання параметрів радіолінії зв'язку БПЛА в режимі FPV сантиметрового діапазону частот в лабораторних умовах та розроблені:

- алгоритм вимірювань параметрів прийомо-передавача БПЛА та СНК за допомогою лабораторної установки – «імітатора радіолінії передачі даних»;
- еталонний регламентований паспорт для радіолінії між НСК та БПЛА в режимі FPV та представлений приклад заповненого розробленого паспорта (формуляру) радіолінії передачі даних БпАК з інформацією про максимально можливу дальність польоту в режимі FPV.

Також наведений приклад застосування лабораторної установки «імітатора радіолінії передачі даних» для визначення максимальної дальності польоту БПЛА в режимі FPV із застосуванням прийомо-передавача та відеокамери для частотного діапазону 12,75 ГГц – 13,25 ГГц з застосуванням конкретних зразків прийомо-передавачів: SAF CFM, виробництва SAF Tehnika, м. Рига, Латвія.

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: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939>.
- [2] C. Diakhate, “Propagation channel modeling at centimeter–and–millimeter–wave frequencies in 5G urban micro–cellular context”, PhD thesis, Université Paris Saclay, Paris, France, 2019. [Online]. Available: <https://pastel.hal.science/tel-02133961>. Accessed on: May 01, 2024.
- [3] F.D. Diba et al., “Centimeter and mm-wave propagation characteristics for indoor corridors”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158726-158737, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130293>.
- [4] 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: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264648>.
- [5] 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 Transactions on Communications*, vol. 46, iss. 11, pp. 1484-1496, 1998, doi: <https://doi.org/10.1109/26.729393>.
- [6] Recommendation ITU-R V.431-8 (08/2015): Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. V Series. Vocabulary and related subjects, 2015. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-E.pdf. Accessed on: Apr. 11, 2024.
- [7] SAF ODU Testing Equipment. Technical Specification. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://www.saftehnika.com>. Accessed on: Mar. 03, 2024.
- [8] 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: Mar. 04, 2024.
- [9] SG Compact Signal generator 6-40 GHz. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://www.saftehnika.com>. Accessed on: Mar. 03, 2024.
- [10] Spectrum Compact. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://www.spectrumcompact.com>. Accessed on: Mar. 03, 2024.
- [11] Spectrum Compact Family Brochure, 2023. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://spectrumcompact.com/uploads/2024/05/Spectrum-Compact-Family-Brochure-A4-2023-WEB-FILE.pdf>. Accessed on: Mar. 07, 2024.
- [12] Connectors JX-AT-DC40G-xdB. 1/2/3/4/5/6/10/20/30dB High Frequency Attenuator Operating From DC-40GHz With 2.92. Jing Xin Technology. [Online]. Available: <https://www.cdjx-mw.com/123456102030db-high-frequency-attenuator-operating-from-dc-40ghz-with-2-92-connectors-jx-at-dc40g-xdb-produc>. Accessed on: Mar. 07, 2024.
- [13] Coaxial-Waveguide Adapter Specifications. GRANTE. [Online]. Available: <https://www.grante.hu/static/597-wga.pdf>. Accessed on: Mar. 15, 2024.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024.

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: <https://doi.org/10.20535/2411-1031.2023.11.2.293939>.
- [2]. C. Diakhate, "Propagation channel modeling at centimeter–and–millimeter–wave frequencies in 5G urban micro–cellular context", PhD thesis, Université Paris Saclay, Paris, France, 2019. [Online]. Available: <https://pastel.hal.science/tel-02133961>. Accessed on: May 01, 2024.
- [3]. F.D. Diba et al., "Centimeter and mm-wave propagation characteristics for indoor corridors", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158726-158737, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130293>.
- [4]. 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: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264648>.
- [5]. 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 Transactions on Communications*, vol. 46, iss. 11, pp. 1484-1496, 1998, doi: <https://doi.org/10.1109/26.729393>.
- [6]. Recommendation ITU-R V.431-8 (08/2015): Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. V Series. Vocabulary and related subjects, 2015. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/v/R-REC-V.431-8-201508-I!!PDF-E.pdf. Accessed on: Apr. 11, 2024.
- [7]. SAF ODU Testing Equipment. Technical Specification. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://www.saftehnika.com>. Accessed on: Mar. 03, 2024.
- [8]. 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: Mar. 04, 2024.
- [9]. SG Compact Signal generator 6-40 GHz. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://www.saftehnika.com>. Accessed on: Mar. 03, 2024.
- [10]. Spectrum Compact. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://www.spectrumcompact.com>. Accessed on: Mar. 03, 2024.
- [11]. Spectrum Compact Family Brochure, 2023. SAF Tehnika A/S. [Online]. Available: <https://spectrumcompact.com/uploads/2024/05/Spectrum-Compact-Family-Brochure-A4-2023-WEB-FILE.pdf>. Accessed on: Mar. 07, 2024.
- [12]. Connectors JX-AT-DC40G-xdB. 1/2/3/4/5/6/10/20/30dB High Frequency Attenuator Operating From DC-40GHz With 2.92. Jing Xin Technology. [Online]. Available: <https://www.cdjx-mw.com/123456102030db-high-frequency-attenuator-operating-from-dc-40ghz-with-2-92-connectors-jx-at-dc40g-xdb-produc>. Accessed on: Mar. 07, 2024.
- [13]. Coaxial-Waveguide Adapter Specifications. GRANTE. [Online]. Available: <https://www.grante.hu/static/597-wga.pdf>. Accessed on: Mar. 15, 2024.

OLEKSANDR SALIY,
SERHII VASYLENKO,
YAROSLAV ZINCHENKO,
OLEKSIY KHAKHLYUK

ALGORITHM FOR MEASURING PARAMETERS OF RADIO LINK OF AN UNMANNED AIRCRAFT IN FPV MODE OF THE CENTIMETER FREQUENCY RANGE

The mass use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the mode of remote control "from the first person" (First Person View, FPV) in combat operations radically changes the picture of modern war. Their use makes it possible to damage or destroy enemy equipment, the cost of which is hundreds of times higher than the cost of UAVs.

To successfully perform the UAV flight mission in FPV mode, it is necessary to ensure stable radio communication of the UAV with the ground control station (GSC). In the work to organize a

radio line between the GSC and the UAV, it is proposed to use radio lines of the centimeter frequency range.

At the same time, at the stage of flight mission planning, the UAV operator needs to have information about the parameters of the receiving and transmitting devices of the unmanned aerial vehicle complex (UAVC) in order to calculate the maximum flight range.

The purpose of the work is to develop an algorithm for measuring parameters of the radio link of an unmanned aerial vehicle in the FPV mode of the centimeter frequency range. The use of this information will allow the UAVC operator to create a flight map and prepare for a combat mission.

The material presented in the article contains practical value for UAV operators and can be used in the organization and planning of the flight mission of multi-rotor UAVs of the tactical level at a given distance. Also, the material can be used by UAV service units for the purpose of checking the technical parameters of the radio link between the UAV and GSC and the optical systems installed on board the UAV (video cameras, thermal imaging cameras, etc.).

Keywords: UAV, FPV, data-link, radio link 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”, м. Київ, Україна, ORCID <http://orcid.org/0009-0002-7021-5288>, os.telcom2024@gmail.com.

Василенко Сергій Вікторович, кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник науково-дослідної спеціальної лабораторії Науково-дослідного центру, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-6779-8246>, vasylenko.phd@gmail.com.

Зінченко Ярослав Вікторович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник Науково-дослідного центру, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, <http://orcid.org/0000-0001-9574-3947>, wmed75@ukr.net.

Хахлюк Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та захисту інформації, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-1749-0109>, khakhlyuk@gmail.com.

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

Vasylenko Serhii, candidate of technical sciences, senior researcher, head of the research laboratory of the Research center, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Zinchenko Yaroslav, candidate of technical sciences, senior researcher, head of the Research center, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Khakhliuk Oleksii, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor at the cybersecurity and information security academic department, Institute of special communications and information security of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.