

УДК 621.391

канд. техн. наук, доцент Гурський Т. Г. ORCID: 0000-0001-7646-853X (НДІ ВР)

канд. техн. наук, доцент Панченко І. В. ORCID: 0000-0001-5690-3813 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

канд. техн. наук, доцент Восколович О. І. ORCID: 0000-0002-6353-868X (ВІТІ ім. Героїв Крут)

Салій О. С. ORCID: 0009-0002-7021-5288 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

канд. техн. наук, доцент Котенко В. М. ORCID: 0009-0003-4177-6841 (ЖВІ ім. С. П. Корольова)

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕННЯ КАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ БПЛА ТИПУ FPV

У ході широкомасштабної агресії проти України збройні сили російської федерації широко застосовують мультироторні БпЛА типу FPV у якості "дронів-камікадзе".

Одним з найбільш ефективних способів захисту особового складу Сил оборони України, озброєння та військової техніки в таких умовах є застосування малопотужних засобів РЕБ, завданням яких є унеможливлення роботи каналу управління ворожим БпЛА. Одним із основних показників ефективності таких засобів є відстань, на якій забезпечується подавлення каналу управління ворожим БпЛА.

Тому, метою статті є розроблення математичної моделі для розрахунку відстані гарантованого подавлення каналів дистанційного управління безпілотними літальними апаратами засобами радіоелектронної боротьби.

У статті розроблено відповідну математичну модель, яка враховує топологію розташування засобу РЕБ, ворожого БпЛА та його наземної станції управління, їх енергетичні параметри, ширину смуги завади, параметри корисного сигналу та інші параметри. Для полегшення розрахунків, з урахуванням прийнятих обмежень і припущень (зокрема – втрати сигналу при розповсюдженні у середовищі відповідають втратам у вільному просторі), отримана спрощена математична модель. У якості прикладу наведені розрахунки очікуваної відстані гарантованого подавлення каналів управління, реалізованих на базі протоколів ELRS та Crossfire в діапазоні частот 900 МГц, при застосуванні загороджувальної завади з шириною спектру 25 МГц при значеннях потужності передавача засобу РЕБ 10, 50 та 100 Вт, для відстані між наземною станцією управління та засобом постановки завад 5 та 10 км, для висот польоту ворожого безпілотного літального апарату від 50 до 1000 м.

Розроблена модель може використовуватися при плануванні та організації захисту від ворожих БпЛА типу FPV, які виконують польотну місію "дрона-камікадзе".

Ключові слова: *рівняння радіолінії, втрати у вільному просторі, радіоелектронне подавлення, наземна станція управління, безпілотний літальний апарат, відношення сигнал/завада, відстань гарантованого подавлення.*

T. Hurskyi, I. Panchenko, O. Voskolovych, O. Saliy, I. Kotenko. Evaluation of the efficiency of radio electronic suppression of FPV UAV control channels

During the large-scale aggression against Ukraine, the armed forces of the Russian Federation widely use multi-rotor UAV of the FPV type as "kamikaze drones."

One of the most effective ways to protect the personnel of the Ukrainian Defence Forces, weapons and military equipment in such conditions is the use of low-power electronic warfare (EW) means, the task of which is to disable the operation of the enemy UAV control channel. One of the main indicators of the effectiveness of such means is the distance at which the suppression of the enemy UAV control channel is ensured.

Therefore, the purpose of the article is to develop a mathematical model for calculating the distance of guaranteed suppression of remote control channels of unmanned aerial vehicles by electronic warfare means.

The article develops a corresponding mathematical model that takes into account the topology of the location of the electronic warfare system, the enemy UAV and its ground control station, their energy parameters, the width of the interference bandwidth, the parameters of the useful signal and other parameters. To facilitate calculations, taking into account the adopted restrictions and assumptions (in particular, signal losses during propagation in the environment correspond to losses in free space), a simplified mathematical model was obtained. As an example, calculations of the expected distance of guaranteed suppression of control channels implemented on the basis of the ELRS and Crossfire protocols in the 900 MHz frequency range are given, when using a blocking jammer with a spectrum width of 25 MHz at EW transmitter power values of 10, 50 and 100 W, for a distance between the ground control station and the jamming device of 5 and 10 km, for flight altitudes of the enemy unmanned aerial vehicle from 50 to 1000 m.

The developed model can be used in planning and organizing defense against enemy FPV UAVs that perform a "kamikaze drone" flight mission.

Keywords: *radio link equation, free space losses, radio electronic suppression, ground control station, unmanned aerial vehicle, signal/interference ratio, guaranteed suppression distance.*

Постановка проблеми

В останні десятиліття стрімко розвивається теорія і практика бойового застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) [1]. Зокрема, у ході широкомасштабної агресії проти України противник широко застосовує мультироторні безпілотні літальні апарати (БпЛА) типу FPV (з англ. First Person View – в режимі “управління від першої особи”) у якості “дронів-камікадзе” для ураження особового складу та техніки Сил оборони України [2]. Невелика вартість таких дронів робить їх застосування масовим.

Одним із ключових умов, які визначають ефективність виконання польотної місії таких БпЛА, є забезпечення надійного радіозв'язку з їх наземними станціями управління для передавання команд дистанційного управління та приймання сигналів телеметрії. Тому, найбільш ефективним засобом протидії ворожим БпЛА є радіоелектронне подавлення сигналу управління на входах їх приймачів, які передаються відповідними ворожими наземними станціями управління (НСУ). При цьому, завдання виявлення сигналів дистанційного управління БпЛА вирішується засобами радіоелектронної розвідки, які можуть застосовуватись як окремо, так і бути інтегрованими у засоби (комплекси) радіоелектронної боротьби (РЕБ).

За час широкомасштабної російсько-української війни в Україні вироблено велику кількість модифікацій засобів, призначених для захисту від FPV-дронів, які називають “окопними” або “купольними” засобами РЕБ [3; 4]. Як правило, такі засоби здатні одночасно створювати декілька загороджувальних завад у діапазонах частот від 300 МГц до 6000 МГц. Оцінка ефективності застосування таких засобів є важливим та актуальним завданням на етапі планування радіоелектронного захисту підрозділів Сил оборони України. Одним з основних параметрів, який визначає ефективність застосування засобів РЕБ, є відстань ефективного (гарантованого) подавлення, на якій створюється таке відношення сигнал/завада на вході приймача каналу управління БпЛА, при якому приймання цифрового сигналу із заданою достовірністю (ймовірністю бітової помилки) буде неможливе.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні відомі декілька варіантів реалізації протоколу управління БпЛА типу FPV [5]. Аналіз характеристик та можливостей деяких засобів РЕБ, призначених для радіоелектронного подавлення каналів радіоліній дистанційного управління БпЛА типу FPV, наведено в [4]. Виробники цих засобів, як правило, надають орієнтовні дані щодо відстані гарантованого подавлення (ефективного радіусу дії), проте не наводять умов (енергетичні параметри НСУ, відстань від НСУ до засобу РЕБ тощо), яким вони відповідають. У роботах [6; 7] запропоновано підхід до оцінювання завадозахищеності повітряного ретранслятора радіомережі, на приймач якого впливає наземний постановник завад. На основі цього ж підходу можна вирішити і зворотну задачу – оцінити ефективність застосування засобу РЕБ (відстань гарантованого подавлення каналу управління ворожого БпЛА) в конкретних умовах.

Метою статті є розроблення математичної моделі для розрахунку відстані гарантованого подавлення каналів дистанційного управління ворожого БпЛА засобами радіоелектронної боротьби.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для визначення відстані подавлення каналу управління ворожого БпЛА необхідно розрахувати відношення σ рівня сигналу НСУ до рівня завади, створюваної засобом РЕБ (постановником завад, ПЗ) на вході приймача ворожого БпЛА, для різних відстаней між БпЛА та ПЗ

$$\sigma(R_j) = P_c - P_z, \quad (1)$$

де P_c – рівень сигналу НСУ на вході приймача БпЛА, дБ;

P_z – рівень завади на вході приймача БпЛА, дБ;

R_j – відстань між ПЗ та БпЛА, м,
і визначити відстань, при якій це відношення стає меншим за допустиме для забезпечення можливості успішного приймання сигналу управління ворожим БпЛА.

Для визначення як P_c , так і P_z , необхідно розв'язати задачу з розрахунку рівня сигналу на вході приймача, згідно з концепцією втрат передачі для радіолінії при розповсюдженні радіохвиль [8]:

$$P_2 = P_1 + G_1 + G_2 - L_{\phi 1} - L_{\phi 2} - L_{\Sigma} - W_3, \quad (2)$$

де P_2 – рівень сигналу на вході приймача, дБмВт;

P_1 – рівень сигналу на виході передавача, дБмВт;

G_1, G_2 – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен, відповідно, дБі;

$L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ – втрати у антенно-фідерних трактах на передачі та прийомі, відповідно, дБ;

L_{Σ} – сумарні втрати сигналу при розповсюдженні радіохвиль, дБ,

W_3 – енергетичний запас, який враховують для забезпечення компенсації втрат сигналу на прийомі через низку несприятливих факторів, дБ (при проведенні розрахунків у системах радіозв'язку зазвичай приймається рівним 10–15 дБ).

Сумарні втрати визначаються згідно з виразом

$$L_{\Sigma} = L_0 + L_{\text{сер}}, \quad (3)$$

де L_0 – основні втрати радіолінії (втрати у вільному просторі);

$L_{\text{сер}}$ – втрати, які визначають вплив реального середовища на розповсюдження радіохвиль (так званий множник ослаблення).

Втрати у вільному просторі визначаються за формулою [8]

$$L_0 = 10 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2, \quad (4)$$

де R – відстань між передавачем та приймачем;

λ – довжина хвилі.

На підставі виразу (2) можуть здійснюватися розрахунки для будь-яких радіоліній. Відмінність полягає у методиці розрахунку сумарних втрат L_{Σ} .

Геометрична модель взаємного розташування ПЗ, ворожого БпЛА та його НСУ наведена на рисунку 1, де R_0 – відстань між НСУ та ПЗ, h – висота польоту БпЛА. Якщо з точки поточного розташування БпЛА опустити проекцію на Землю (у точку S), то відстань від НСУ до точки S позначимо R_i , тоді для відповідного положення БпЛА відстань між ним та ПЗ становитиме R_j , при цьому

$$R_i = R_0 - R_j. \quad (5)$$

Тоді у кожній точці траєкторії руху БпЛА у напрямку на ПЗ відстань від між ПЗ та БпЛА можна виразити, як

$$R_{\text{ПЗ}} = \sqrt{(R_j^2 + h^2)}, \quad (6)$$

а відстань від НСУ до БпЛА, з урахуванням (5)

$$R_{НСУ} = \sqrt{(R_i^2 + h^2)} = \sqrt{\left((R_0 - R_j)^2 + h^2\right)}. \quad (7)$$

З рисунка 1 видно, що відстань гарантованого подавлення може бути задана як абсолютна відстань від ПЗ до БпЛА $R_{ПЗ}$, так і відносна відстань – R_j , при яких забезпечується необхідне відношення сигнал/завада на вході приймача каналу управління БпЛА (при цьому для усунення неоднозначності у обох випадках необхідно зазначати, якій висоті польоту БпЛА відповідає це значення).

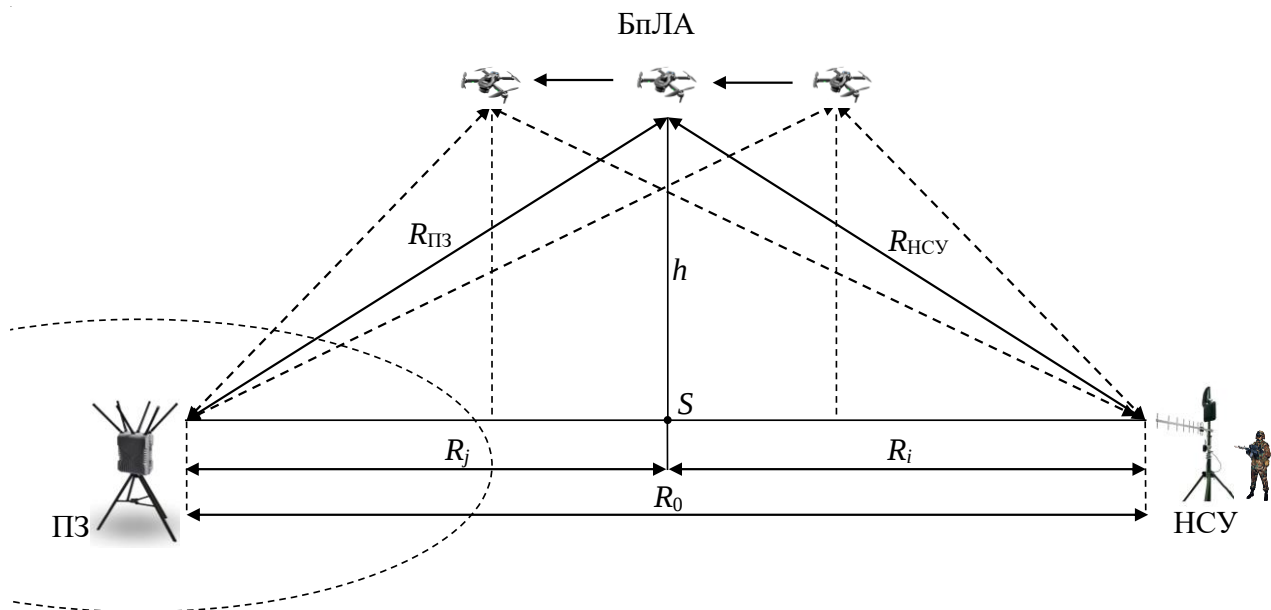


Рис. 1. Геометрична модель взаємного розташування НСУ, ПЗ та БпЛА під час його польоту

Основні параметри сигналів деяких найбільш поширених протоколів управління FPV-дронами, необхідні для проведення розрахунків, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри сигналів деяких протоколів управління FPV-дронами

Протокол / модуляція	Розширення спектра	Смуга частот, МГц	Миттєва ширина спектра сигналу, кГц
Express LRS / ЛЧМ	ППРЧ	902–927	500
Crossfire / ЛЧМ	ППРЧ	868–893	250
ЧМ-2	ППРЧ	902–927	90

Наведені протоколи використовують псевдовипадкове перестроювання робочої частоти (ППРЧ). Тому, спектральна щільність потужності завади, яка перекриває смугу частот сигналу дистанційного управління БпЛА, буде дорівнювати [7]:

$$S_{ПЗ} = P_{ПЗ} / \Delta F_{ш}, \quad (8)$$

де $S_{ПЗ}$ – спектральна щільність потужності завади, дБмВт/Гц; $P_{ПЗ}$ – потужність передавача станції завад, дБмВт; $\Delta F_{ПЗ}$ – смуга частот шумової завади, Гц.

У режимі ППРЧ на радіолінії дистанційного управління між НСУ та БпЛА в кожен момент часу використовується один з умовних елементарних каналів шириною Δf_k з потужністю $P_{НСУ}$, що дорівнює вихідній потужності передавача НСУ. У смузі завади шириною $\Delta F_{ПЗ}$ міститься

$$N = \Delta F_{ПЗ} / \Delta f_k$$

умовних елементарних каналів. Потужність завади $P_{ПЗ0}$, що приходить на один умовний елементарний канал на вході приймача БпЛА, дорівнює:

$$P_{ПЗ0} = S_{ПЗ} \cdot \Delta f_k = P_{ПЗ} / N. \quad (9)$$

Фактично, N дорівнює коефіцієнту розширення спектра сигналу, і чим воно більше, тим менше значення $P_{ПЗ0}$ і тим більший енергетичний виграш отримує радіолінія між БпЛА та НСУ (лінія дистанційного управління ворожим БпЛА) відносно постановника широкосмугової завади. Саме значення $P_{ПЗ0}$ необхідно підставляти у вираз (2) замість P_1 при розрахунку рівня завади P_z на вході приймача.

Перепишемо вираз (1) з урахуванням (2), (8), (9) (при цьому для обох радіоліній (як НСУ – БпЛА, так і ПЗ – БпЛА) втрати у антенно-фідерних трактах приймемо рівними нулю, енергетичний запас – однаковим, коефіцієнт підсилення антени БпЛА – однаковим):

$$\zeta(R_j) = P_{НСУ} + G_{НСУ} - L_{\Sigma_{НСУ}} - P_{ПЗ} \frac{\Delta f_k}{\Delta F_{ПЗ}} - G_{ПЗ} + L_{\Sigma_{ПЗ}}, \quad (10)$$

де $P_{НСУ}$ – потужність передавача НСУ, дБмВт;

$G_{НСУ}$ – коефіцієнт підсилення антени НСУ, дБі;

$L_{\Sigma_{НСУ}}$ – сумарні втрати радіосигналу при розповсюдженні радіохвиль на радіолінії НСУ – БпЛА, дБ;

$P_{ПЗ}$ – потужність передавача ПЗ, дБмВт;

$G_{ПЗ}$ – коефіцієнт підсилення антени ПЗ, дБі;

$L_{\Sigma_{ПЗ}}$ – сумарні втрати сигналу на радіолінії ПЗ – БпЛА.

Для спрощення розрахунків введемо такі обмеження припущення:

1) сумарні втрати на радіолініях ПЗ – БпЛА та НСУ – БпЛА дорівнюють втратам у вільному просторі ($L_{\Sigma_{НСУ}} = L_{0_{НСУ}}$; $L_{\Sigma_{ПЗ}} = L_{0_{ПЗ}}$);

2) БпЛА злітає вертикально вгору над НСУ, піднімається на висоту h і починає рух у напрямку постановника завад, не змінюючи при цьому висоту польоту;

3) відстань гарантованого подавлення будемо визначати, як відносну відстань R_j .

Тоді вираз (10) з урахуванням (3)–(7) можна переписати таким чином:

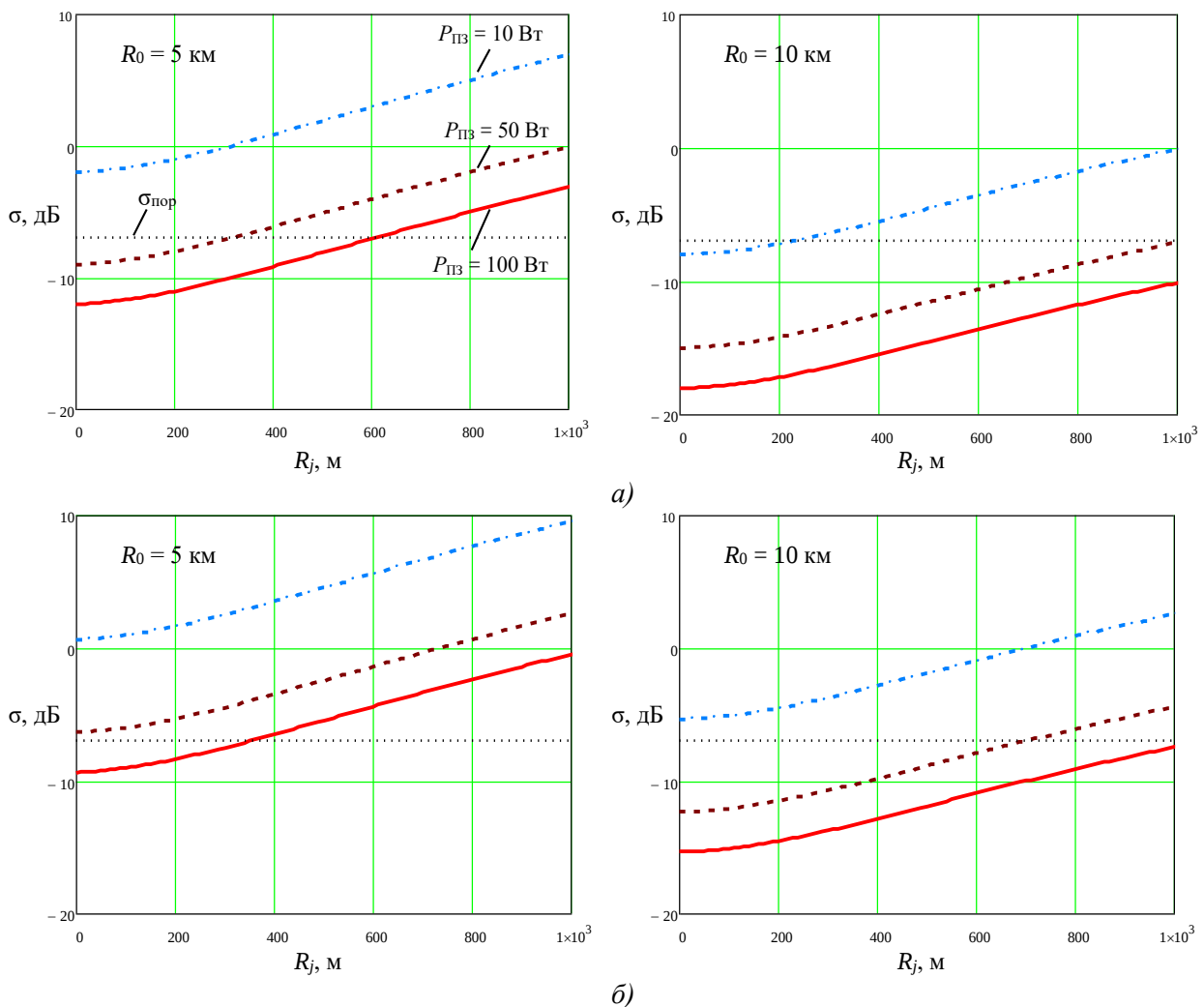
$$\zeta(R_j) = P_{НСУ} + G_{НСУ} - P_{ПЗ} \frac{\Delta f_k}{\Delta F_{ПЗ}} - G_{ПЗ} + 10 \lg \left(\frac{R_j^2 + h^2}{(R_0 - R_j)^2 + h^2} \right), \quad (11)$$

де позначення R_0 та R_j відповідають рисунку 1.

На рисунку 2 для прикладу наведені результати розрахунків залежності відношення сигнал/завада на вході приймача БпЛА від відстані між ПЗ та БпЛА для таких вихідних даних: $h = 500$ м; R_0 приймає значення 5 та 10 км; $P_{НСУ} = 2$ Вт; $G_{НСУ} = 13$ дБі (антена типу “хвильовий канал”); $P_{ПЗ}$ може приймати значення 10, 50 і 100 Вт; $G_{ПЗ} = 5$ дБі (всеспрямована антена); протоколи, які використовуються для дистанційного управління БпЛА, відповідають таблиці 1; ПЗ використовує шумову загороджувальну заваду з шириною спектра $\Delta F_{ПЗ}$, яка дорівнює ширині смуги ППРЧ каналу управління БпЛА (25 МГц).

Для протоколу Crossfire успішний прийом сигналу можливий при забезпеченні відношення сигнал/шум (сигнал/завада) не нижче -6 дБ [9]. Приймемо, що відношення сигнал/завада, яке необхідно забезпечити для гарантованого подавлення каналу управління, для протоколів з використанням лінійної частотної модуляції (ЛЧМ), становить $\zeta_{пор} \leq -7$ дБ, а для протоколу, який використовує двійкову частотну маніпуляцію – $\zeta_{пор} \leq 3$ дБ (для проведення розрахунків у реальних умовах, необхідно використовувати точні значення $\zeta_{пор}$ для конкретного протоколу з відповідними значеннями параметрів сигналу, які використовуються).

Криві, нанесені на рисунку 2 суцільною лінією, відповідають потужності передавача ПЗ, рівній 100 Вт (50 дБмВт), штрих-пунктирною – 50 Вт (47 дБмВт), пунктирною – 10 Вт (40 дБмВт). Штриховою прямою лінією на графіках позначений пороговий рівень відношення сигнал/завада $\zeta_{пор}$, при забезпеченні якого лінія дистанційного управління (радіолінія між НСУ та БпЛА) вважається подавленою, а відповідне йому значення R_j є відстанню гарантованого подавлення.



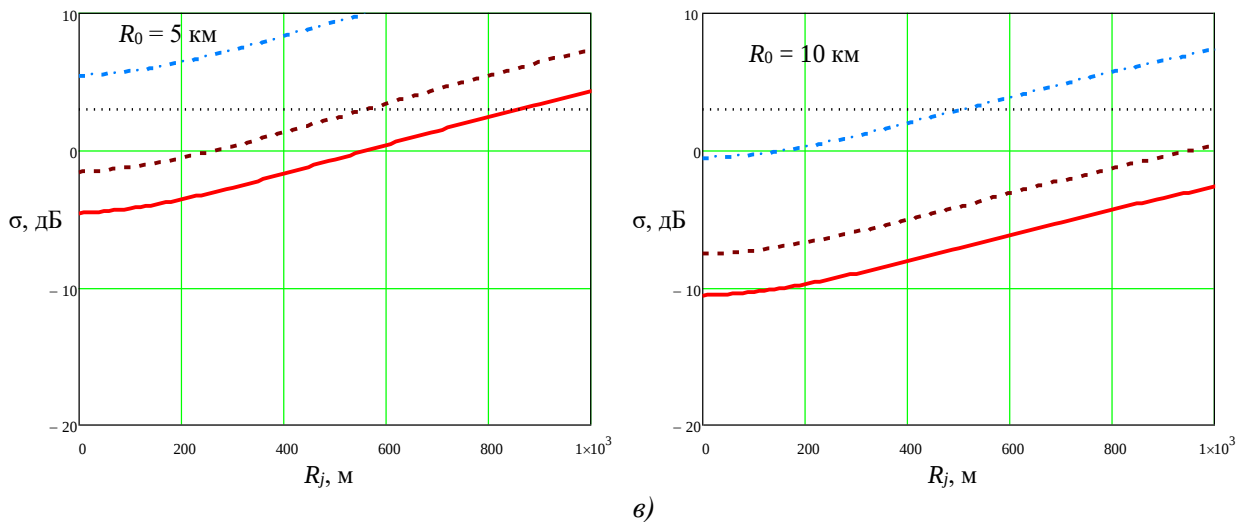


Рис. 2. Графіки залежності відношення сигнал/завада на вході приймача БпЛА від відстані між ПЗ та БпЛА R_j при $h = 500$ м:

a – протокол Express LRS; b – протокол Crossfire; $в$ – протокол з використанням ЧМ-2

У таблиці 2 наведено результати розрахунків відстані гарантованого подавлення R_j для різних протоколів каналу управління БпЛА для тих самих вихідних даних, але для різних значень висоти польоту БпЛА.

Таблиця 2

Відстань гарантованого подавлення каналу управління FPV-дроном							
$h, \text{ м}$	$P_{\text{ПЗ}}, \text{ Вт}$	Відстань гарантованого подавлення $R_j, \text{ м}$					
		Протокол Express LRS		Протокол Crossfire		Протокол з ЧМ-2	
		$R_0, \text{ км}$		$R_0, \text{ км}$		$R_0, \text{ км}$	
		5	10	5	10	5	10
50	10	260	530	190	390	340	690
	50	550	1110	420	840	720	1440
	100	750	1500	570	1150	960	1920
100	10	250	520	170	380	330	690
	50	550	1110	410	840	710	1440
	100	750	1500	570	1150	950	1920
200	10	180	490	40	340	290	670
	50	530	1100	370	820	690	1430
	100	730	1490	540	1140	940	1910
500	10	-	230	-	-	-	510
	50	310	1010	-	700	560	1370
	100	600	1440	350	1050	860	1870
1000	10	-	-	-	-	-	-
	50	-	630	-	-	-	1130
	100	-	1200	-	700	470	1720

На рисунку 3 наведено результати розрахунків залежності відношення сигнал/завада на вході приймача БпЛА від висоти його польоту h для наступних вихідних даних: відстань між ПЗ та БпЛА – 50, 100, 200, 500 і 1000 м; R_0 дорівнює 5 та 10 км; $P_{\text{НСУ}} = 2$ Вт; $G_{\text{НСУ}} = 13$ дБі; $P_{\text{ПЗ}} = 50$ Вт; $G_{\text{ПЗ}} = 5$ дБі; протокол, який використовується для дистанційного управління БпЛА – Express LRS; ПЗ використовує шумову загороджувальну заваду з шириною спектра $\Delta F_{\text{ПЗ}}$, яка дорівнює ширині смуги ППРЧ каналу управління БпЛА (25 МГц).

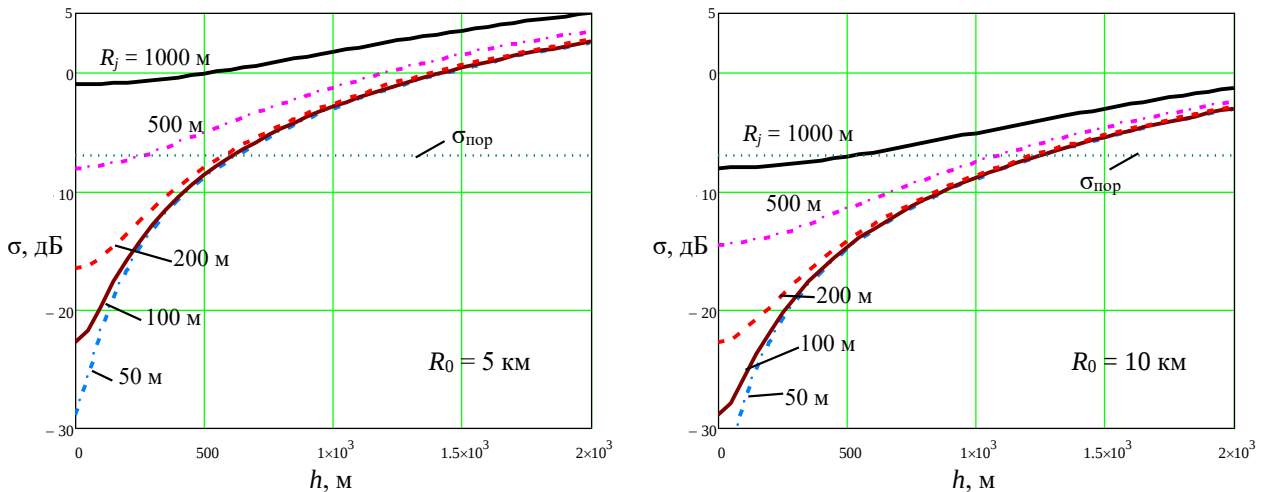


Рис. 3. Графіки залежності відношення сигнал/завада на вході приймача БпЛА від висоти його польоту h для різних відстаней R_j між ПЗ та БпЛА при $P_{ПЗ} = 50$ Вт, протокол Express LRS

З графіків на рисунках 2, 3 та розрахункових даних у таблиці 2 можна зробити наступні висновки:

1) серед розглянутих протоколів найскладніше подавити канал управління БпЛА на базі протоколу Crossfire з ЛЧМ, найлегше – на базі протоколу з ЧМ-2;

2) відстань гарантованого подавлення зменшується:

при зменшенні відстані між ворожою НСУ та постановником завад;

при збільшенні висоти польоту ворожого БпЛА;

при збільшенні коефіцієнта розширення спектра сигналу радіолінії дистанційного управління ворожим БпЛА.

Підвищити ефективність радіоелектронного подавлення каналів дистанційного управління БпЛА можна за рахунок наступних заходів:

збільшення потужності передавача постановника завад, що призведе до збільшення ймовірності виявлення координат постановника завад засобами радіоелектронної розвідки противника;

використання антен з більшим коефіцієнтом підсилення (у випадку спрямованих антен типу “хвильовий канал” при одночасному застосуванні противником декількох БпЛА збільшиться ймовірність “пропуску цілей” з інших просторових напрямків);

використання більш ефективних типів завад, зокрема, завад у відповідь (ЗВ) [12] з шириною спектра, яка відповідає миттєвій ширині спектра сигналу. Це дасть змогу забезпечити вимоги до відстані ефективного подавлення при меншій потужності передавача.

Значно вища ефективність ЗВ, порівняно із загороджувальною, підтверджується графіками на рисунку 4, де наведені результати розрахунків залежності відношення сигнал/завада на вході приймача БпЛА від відстані між ПЗ та БпЛА для таких вихідних даних: $h = 500$ м; R_0 приймає значення 5 та 10 км; $P_{НСУ} = 2$ Вт; $G_{НСУ} = 13$ дБі; $P_{ПЗ} = 50$ Вт; $G_{ПЗ} = 5$ дБі; протокол, який використовується для дистанційного управління БпЛА – Express LRS; ПЗ №1 використовує шумову загороджувальну заваду з шириною спектра $\Delta F_{ПЗ}$, яка дорівнює ширині смуги ППРЧ каналу управління БпЛА (25 МГц); ПЗ №2 – ЗВ з шириною спектра, рівною миттєвій ширині спектра сигналу (500 кГц), при цьому приймалося припущення, що затримкою, з якою ЗВ змінює частоту вслід за частотою сигналу лінії дистанційного управління БпЛА, можна знехтувати.

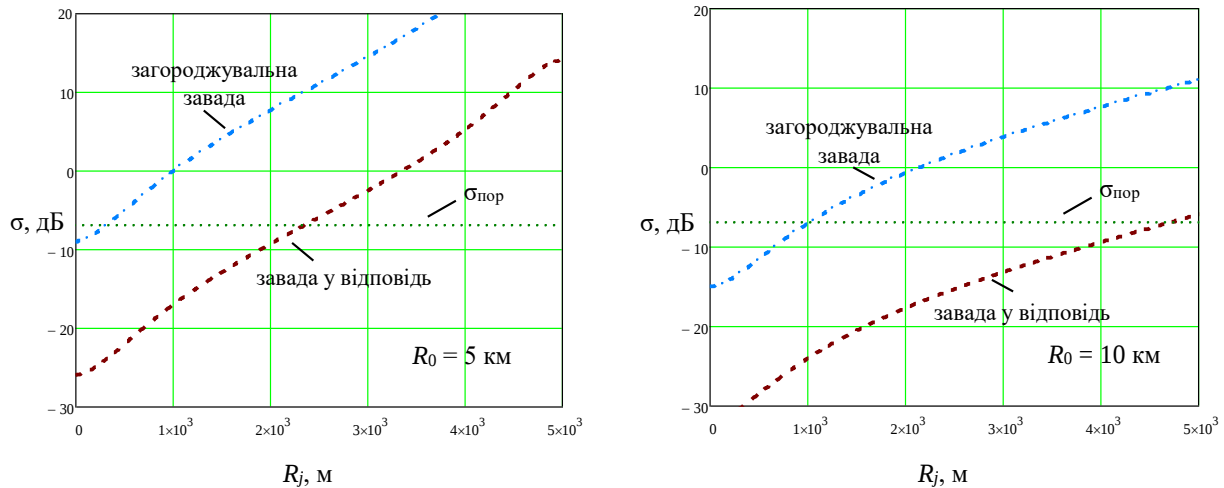


Рис. 4. Графіки залежності відношення сигнал/завада на вході приймача БпЛА від відстані між ПЗ та БпЛА R_j при $h = 500$ м, $P_{\text{ПЗ}} = 50$ Вт, протокол Express LRS

Водночас, в умовах застосування завад у відповідь (ЗВ), при одночасному застосуванні противником декількох БпЛА з каналами дистанційного управління в одному діапазоні частот, завдання їх одночасного ефективного подавлення суттєво ускладнюється, а його вирішення буде залежати від технічних можливостей засобу РЕБ.

Для більш точного розрахунку втрат сигналу під час розповсюдження радіохвиль при моделюванні радіоелектронного подавлення каналів телеметрії БпЛА, доцільно використовувати рекомендацію ITU-R P.528 [10], яку можна застосовувати в діапазоні частот 125–15500 МГц при зміні висот підвісу як передавальної, так і приймальної антен, від 1,5 м до 20000 м.

На офіційних сайтах ITU [10] та Інституту досліджень у галузі телекомунікацій (The Institute for Telecommunication Sciences (ITS)) [11], розміщені версії програмної реалізації рекомендації P.528, що дозволяють здійснювати розрахунки L_Σ для будь-яких допустимих вихідних даних.

На рисунку 5 показано результати розрахунку сумарних втрат сигналу з використанням програмного додатку [11] для таких вихідних даних: частота – 915 МГц, висота антени передавача (НСУ) – 2 м, висота антени приймача (БпЛА) – 50, 100, 200, 500, 1000 м. Для висот БпЛА від 200 м і більше, криві практично відповідають втратам у вільному просторі, для висоти 100 м реальні втрати стають дещо більшими починаючи з відстані 6 км, а для висоти 50 м – починаючи з відстані 3 км. Тому, значення відстані гарантованого подавлення для висот БпЛА 50 і 100 м будуть більшими, порівняно з наведеними у таблиці 2. При цьому, зі збільшенням частоти, різниця між кривими, отриманими за допомогою рекомендації P.528, та кривою, що відповідає втратам у вільному просторі, принаймні для відстаней до 10 км, зменшується. Тому, запропонована у статті спрощена модель цілком може бути застосована для орієнтовних розрахунків відстані гарантованого радіоелектронного подавлення каналу дистанційного управління БпЛА з дальністю польоту до 10 км (типу FPV) у типових діапазонах частот від 300 до 6000 МГц.

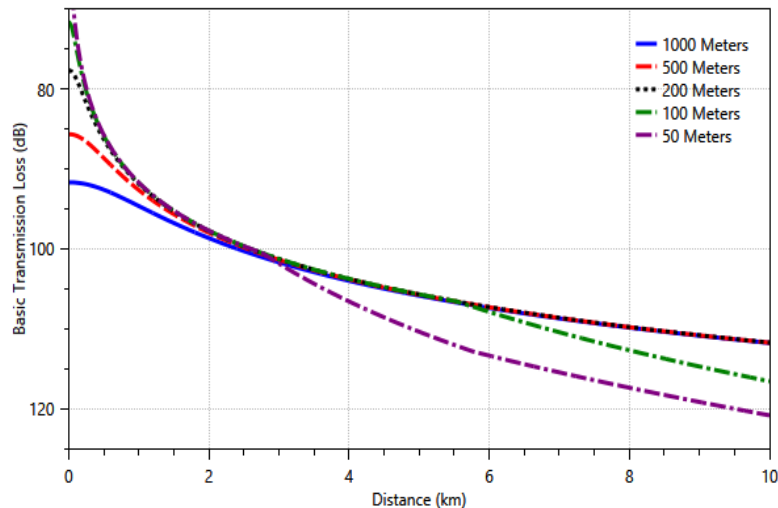


Рис. 5. Втрати сигналу на частоті 915 МГц, розраховані згідно з рекомендацією Р-528

Висновки і перспективи подальших досліджень

Таким чином, у статті розроблено математичну модель, призначену для оцінки ефективності радіоелектронного подавлення каналів управління БПЛА типу FPV. Запропонована модель дає змогу здійснювати розрахунки відношення сигнал/завада на вході приймача каналу управління БПЛА та визначати відстань ефективного (гарантованого) подавлення.

Із використанням спрощеної моделі, для якої втрати сигналу при розповсюдженні радіохвиль приймалися рівними втратам у вільному просторі, проведено розрахунки відстані гарантованого подавлення для типових вихідних даних: канали дистанційного управління БПЛА реалізовані на базі протоколів ELRS та Crossfire в діапазоні частот 900 МГц; тип завади – загороджувальна, з шириною спектра 25 МГц; можливі значення потужності передавача засобу РЕБ – 10, 50 та 100 Вт; можливі значення відстані між наземною станцією управління та постановником завад – 5 та 10 км; можливі значення висоти польоту ворожого БПЛА – 50, 100, 200, 500 та 1000 м.

Запропонована математична модель може використовуватися на початковому етапі планування радіоелектронного захисту підрозділів Сил оборони України як від БПЛА типу FPV, так і від БПЛА інших типів, політ яких здійснюється з використанням радіоліній дистанційного управління. Крім того, вона може застосовуватися розробниками перспективних засобів РЕБ, призначених для подавлення каналів управління ворожих БПЛА, для вибору таких значень енергетичних параметрів, а також типів та параметрів завад, які забезпечуватимуть вимоги до ефективного радіуса дії (відстані гарантованого подавлення).

Напрямок подальших досліджень є програмна реалізація запропонованої моделі з використанням рекомендації ITU-R P.528.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи теорії і практики використання безпілотних авіаційних комплексів ретрансляторів: навч. посіб. / Панченко І. В. та ін. Київ, 2021. 248 с.
2. Панченко І. В. Аналіз бойового застосування мультироторних безпілотних літальних апаратів в умовах роботи спеціального озброєння // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. 2022. № 2 (2). С. 42–47.
3. “Окопна РЕБ” проти БПЛА. URL: <https://armyinform.com.ua/2023/07/15/okopna-reb-proty-bpla>.
4. Порівняльна таблиця РЕБ комплексів для авто, позицій та піхоти. URL: <https://lockey.com.ua/vergleich>.

5. Протокол керування дроном: що це, які існують та для чого потрібні? URL: <https://fx-drones.com/protokol-keruvannia-dronom/>.
6. Аналіз завадозахищеності радіомереж з використанням повітряних ретрансляторів в умовах навмисних шумових завад / [Гурський Т. Г., Сова О. Я., Гриценко К. М., Гай Ю. І.] // Збірник наукових праць ВІТІ. 2018. № 4. С. 26–33.
7. Гурський Т. Г. Аналітична модель оцінки впливу засобів РЕБ на радіолінії з ППРЧ у радіомережах з повітряним та наземним ретрансляторами / Т. Г. Гурський // Збірник наукових праць ВІТІ. 2019. № 3. С. 23–32.
8. Recommendation ITU-R P.341-7 (2019). The concept of transmission loss for radio links. P Series. Radiowave propagation. Електронна публікація, Женева, 2017. ITU 2017. URL: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.
9. TBS Crossfire R/C System. Manual. Revision 2022-08-08. URL: https://www.team-blacksheep.com/media/files/tbs-crossfire-manual.pdf?srsId=AfmBOorxv2d0nbyS-YUXSrUWDXOLPQGGBW7Jv50gZ_WF9Frc7Ry9sClA.
10. Recommendation ITU-R P.528-4 (08/2019). A propagation prediction method for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands. P Series. Radiowave propagation [Ел. ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.528-4-201908-I/en>.
11. Програмна реалізація Рекомендації P.528-4. URL: <https://github.com/NTIA/p528-gui/releases>.
12. Аналіз завадозахищеності радіомереж з ППРЧ в умовах впливу завад у відповідь / Ольшанський В. В., Гурський Т. Г., Остапчук В. М., Лозунов В. К. // Збірник наукових праць ВІТІ. 2020. № 3. С. 56–62.