

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ КОРИСНОЇ ІНФОРМАЦІЇ, ЩО ПЕРЕДАЄТЬСЯ З БОРТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ШЛЯХОМ РАДІОПОДАВЛЕННЯ

У статті оцінено можливості руйнування корисної інформації, що передається з борту безпілотних літальних апаратів у частотному діапазоні 5,2–5,8 ГГц, шляхом активної радіоелектронної протидії. Запропоновано значення потужності передавача – постановника перешкод для ефективного руйнування корисної інформації при різних видах модуляції сигналу.

Постановка проблеми та огляд останніх досліджень і публікацій, у яких започатковане розв'язання проблеми. Науково-технічний прогрес за останні два десятиліття зробив можливим використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Практично всі розвинені країни в тій чи іншій мірі займаються дослідженням безпілотних систем. У даний час вони не тільки доповнюють пілотовані платформи, але й починають виступати їх альтернативою [1]. Тактика застосування БПЛА різноманітна, як правило, вона передбачає політ на гранично малих висотах та складках місцевості, тому їх виявлення радіолокаційними станціями (РЛС) військових зенітно-ракетних комплексів здійснити в цих умовах дуже складно [2, 3].

Боротьба з БПЛА включає в себе комплекс завдань з їх виявлення та розпізнавання, прийняття рішення щодо активного знищення або порушення функціонування шляхом руйнування лінії передачі команд керування, навігаційних систем та передачі корисної інформації [3]. При цьому одним із можливих варіантів подавлення роботи БПЛА є створення перешкод, які порушують правильність функціонування радіолінії передачі корисної інформації.

Для систем зв'язку малих БПЛА вирішальними факторами при виборі частотного діапазону є маса і габарити бортового обладнання й антенно-фідерного пристрою. Для діапазону надвисоких частот вдається створити антену малих розмірів, здатну розміститися в профілі крила. Одним з придатних для цього є частотний діапазон 2,4 ГГц [4]. Перспективним напрямком розвитку систем зв'язку з БПЛА є використання частотного діапазону вище 5 ГГц. Наприклад, конструкторським бюро "Independent development laboratory" розроблено систему передачі даних "INDELA-ATA 5800+", яка встановлюється на БПЛА та використовує саме цей частотний діапазон [5]. При цьому стає можливою передача великого обсягу даних корисного навантаження в режимі реального часу. Факторами, які обмежують радіус дії радіосистеми зв'язку при використанні даного діапазону, є сильна залежність умов поширення електромагнітних хвиль від кліматичних факторів, необхідність прямої видимості та вплив багатопроменевості [6].

Ефективним напрямком протидії БПЛА є застосування системи подавлення радіоліній управління та передачі корисної інформації, яка створює широкосмугову загороджувальну перешкоду на відповідних частотних діапазонах [7].

Метою статті є дослідження можливості руйнування корисної інформації, що передається радіолінією БПЛА наземному комплексу управління (НКУ) в частотному діапазоні 5,2–5,8 ГГц, шляхом активної радіоелектронної протидії.

Формулювання завдання дослідження. Виходячи з цього, **наукове завдання** полягає в оцінюванні впливу загороджувальних та прицільних перешкод на якість передачі інформації з урахуванням рівня потужності корисного сигналу, шуму та перешкод на вході приймача НКУ при різних видах модуляції сигналів. При цьому розраховується показник якості каналу зв'язку за відношенням сигнал/шум (ВСШ), яке визначає ймовірність помилки на один біт.

Виклад основного матеріалу. Залежність імовірності бітової помилки P_{BER} від відношення $q = E_b / N_0$ для видів маніпуляції BPSK/QPSK, 16QAM, 64QAM, що найбільш часто використовуються для передачі корисної інформації радіолінією БПЛА, наведено на рис. 1. Наприклад, для досягнення значення імовірності бітової помилки $P_{BER} = 10^{-6}$ при BPSK модуляції (без використання в радіолінії завадостійкого кодування) необхідно забезпечити відношення $q_{мін} \approx 10,5$ дБ [8].

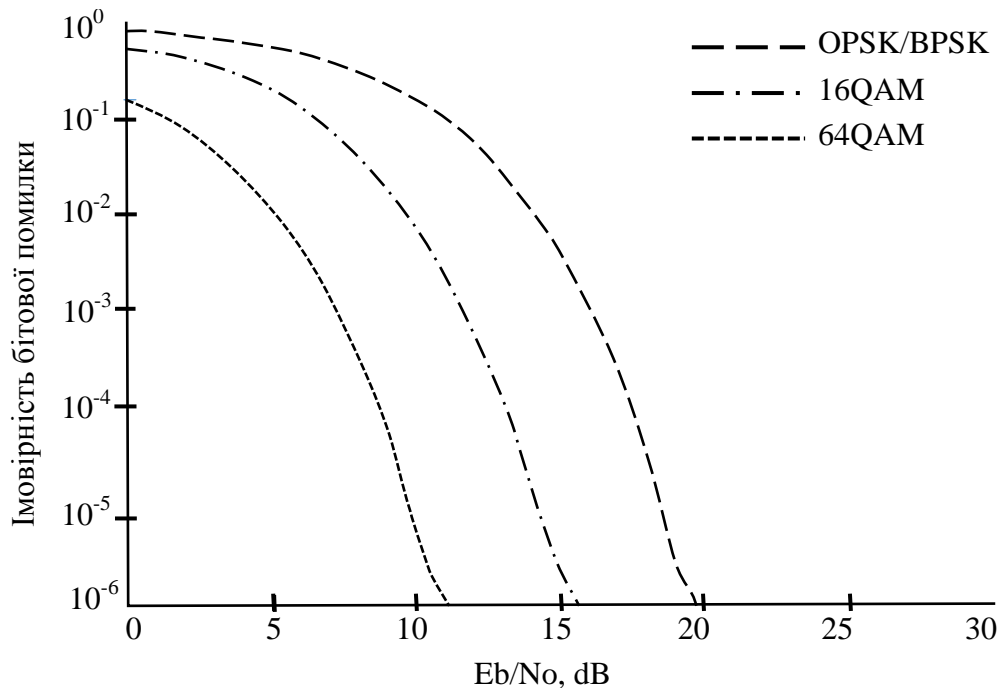


Рис. 1. Імовірність бітової помилки для різних видів модуляції

Припустимо, що в радіолінії використовуються радіохвилі довжиною λ_n , потужність випромінюваних передавальною антеною коливань P_e , її коефіцієнт підсилення G_e , коефіцієнт підсилення приймальної антени G_n . Тоді знайти потужність сигналу на вході приймача НКУ на відстані R від БПЛА можна за формулою [9]:

$$P_c = \frac{P_e G_e G_n \lambda_n^2 \eta_1 \eta_2}{(4\pi)^2 R^2}, \quad (1)$$

де η_1, η_2 – коефіцієнти корисної дії антенно-фідерного передавального та приймального трактів;

γ – послаблення сигналу при розповсюдженні в атмосфері.

Головним завданням є дослідження можливості руйнування корисної інформації, що передається радіолінією шляхом активної радіоелектронної протидії. Залежно від співвідношення ширини спектра сигналу Δf_c і перешкоди Δf_{nn} розрізняють прицільні ($\Delta f_c \approx \Delta f_{nn}$) і загороджувальні ($\Delta f_{nn} \gg \Delta f_c$) шумові перешкоди. Дія активних перешкод призводить до зменшення ВСШ на вході приймача НКУ, що створюється корисним сигналом:

$$q_n = \frac{P_c}{P_{ш0} + mP_{nc}}, \tag{2}$$

де P_{nc} – потужність сигналу, яка створюється на вході приймача НКУ постановником перешкод (ПП);

$$P_{ш0} \text{ – потужність шуму в смузі приймача НКУ; } m = \frac{\Delta f_c}{\Delta f_{nn}}.$$

Значення потужності сигналу, що створюється на вході приймача НКУ ПП, який знаходиться на віддаленні R_{nn} від НКУ, можна визначити згідно з виразом [9]:

$$P_{nc} = \frac{P_{\text{вн}} G_{\text{вн}} G_n K_{\text{БЛ}} \gamma \lambda_{nn}^2 \eta_2 \eta_3}{(4\pi)^2 R_{nn}^2}, \tag{3}$$

де $G_{\text{вн}}$ – коефіцієнт підсилення передавальної антени ПП;

$P_{\text{вн}}$ – потужність коливань, випромінюваних передавальною антеною ПП;

λ_{nn} – довжина хвилі ПП;

$K_{\text{БЛ}}$ – коефіцієнт, що характеризує рівень бічної пелюстки приймальної антени НКУ;

η_3 – коефіцієнт корисної дії антенно-фідерного тракту ПП.

Оцінювання можливості руйнування корисної інформації, що передається радіолінією БПЛА – НКУ шляхом радіоподавлення, здійснимо для системи передачі даних “INDELA ATA-5800+”, основні характеристики якої наведено в табл. 1 [5].

Таблиця 1

Характеристики радіолінії БПЛА–НКУ “INDELA ATA-5800+”

Назва параметра	Розмірність	Значення
Частотний діапазон	МГц	5200–5800
Коефіцієнт підсилення наземної антени	дБ	23
Дальність зв'язку	км	До 45
Швидкість передачі даних	Мбіт/с	40
Коефіцієнт підсилення бортової антени	дБ	7,5
Вихідна потужність бортового передавача	Вт	До 1

Перш за все визначимо, як змінюється ВСШ для цієї системи передачі інформації при зміні дальності прямої видимості R між БПЛА і НКУ. Будемо вважати, що передача цифрового потоку відбувається зі швидкістю 40 Мбіт/с та модуляцією BPSK, 16QAM та 64QAM, $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,6$.

У визначеному діапазоні частот шумова температура приймача не буде перевищувати 500 К [10]. Тоді значення потужності шуму в смузі приймача НКУ при модуляції BPSK $P_{ш0} = 2,76 \cdot 10^{-13}$ Вт. Відомо, що у стандартній атмосфері на частоті 5 ГГц погонне послаблення сигналу становить 0,007 дБ/км [11]. Тоді, враховуючи дані табл. 1, за виразом (1) знайдемо значення потужності сигналу на вході приймача НКУ P_c та розрахуємо ВСШ при різних дальностях R , які занесемо до табл. 2.

Також у табл. 2 наведено дані для інших видів модуляції корисного сигналу із врахуванням того, що при переході до багаторівневої маніпуляції відбувається відповідне звуження спектра корисного сигналу [12].

Таблиця 2

Розрахункові значення ВСШ на вході приймача НКУ при зміні дальності прямої видимості між БПЛА і НКУ

R , м	P_c , Вт	q , дБ		
		BPSK	16QAM	64QAM
1000	$7,1 \cdot 10^{-9}$	44	50	52
5000	$2,8 \cdot 10^{-10}$	30	36	38
10000	$6,3 \cdot 10^{-11}$	24	30	32
25000	$9,9 \cdot 10^{-12}$	16	22	24
45000	$3,3 \cdot 10^{-12}$	10,7	16,7	18,5

Аналіз даних табл. 2 показує, що мінімальне значення ВСШ відповідає максимальній дальності дії радіолінії. Отримані за результатами розрахунків ВСШ для всіх видів модуляції на максимальній дальності практично збігаються з графічними даними, наведеними на рис. 1, та забезпечують $P_{BER} = 10^{-6}$. Отже, значення ВСШ для всіх видів модуляції для максимальної дальності дії радіолінії (без використання завадостійкого кодування) фактично є значенням q_{\min} , при якому забезпечується $P_{BER} = 10^{-6}$.

Визначимо, яку потужність буде створювати на вході приймача НКУ ПП, що використовує як випромінювальну антену напівхвильовий вібратор та має ККД антенно-фідерного тракту $\eta_3 = 0,5$. Розрахунки проведемо для різних відстаней від НКУ та потужності передавача ПП 10 Вт. Для того, щоб скористатися виразом (3), необхідно з'ясувати, яких значень буде набувати коефіцієнт $K_{БЛ}$. Наприклад, якщо ПП знаходиться недалеко від площини руху БПЛА, то можна вважати, що напрямок надходження коливаний перешкоди буде збігатися як мінімум з першою бічною пелюсткою діаграми спрямованості антени "INDELA-RM 5800", зображеної на рис. 2, а її рівень можна прийняти близько -7 дБ, прогалини ж між головною і бічною пелюстками становитимуть -10 дБ [5].

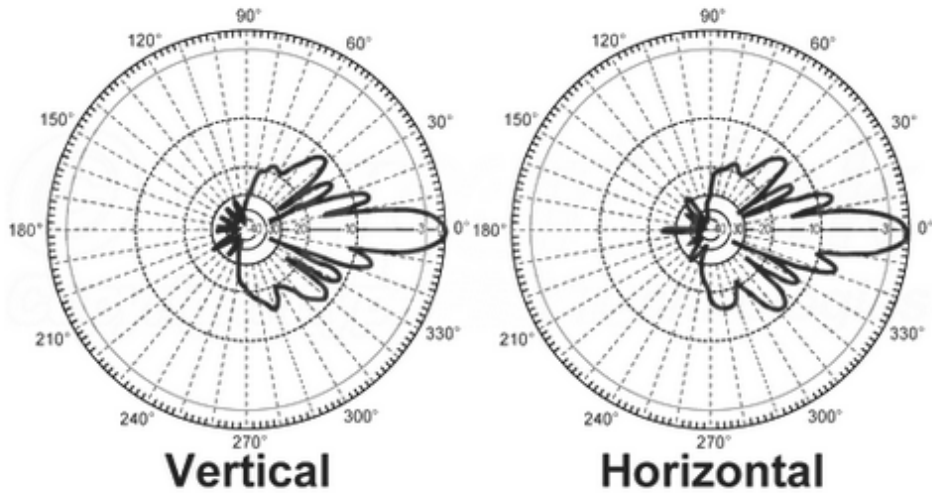


Рис. 2. Діаграма спрямованості антени “INDELA-RM 5800”

Результати розрахунків P_{nc} для випадку потрапляння коливань перешкоди в прогалини між головною і бічною пелюстками діаграми спрямованості ($K_{БЛ} = 0,1$) занесемо до табл. 3, яка також містить розрахунки ВСШ q_n залежно від відстані БПЛА – НКУ, отримані за виразом (2) для прицільної перешкоди ($m = 1$) і для випадку використання BPSK модуляції.

Таблиця 3

Розрахункові значення ВСШ на вході приймача НКУ при використанні прицільної перешкоди і BPSK модуляції (у разях)

R_{nt} , м	P_{nc} , Вт	$R_{БПЛА}$, м				
		1000	5000	10000	25000	45000
1000	$2,1 \cdot 10^{-9}$	3,4	0,13	0,03	0,005	0,002
3000	$2,3 \cdot 10^{-10}$	30	1,23	0,3	0,05	0,014
5000	$8,2 \cdot 10^{-11}$	86	3,4	0,85	0,13	0,04

Аналіз табл. 3 показує, що для варіантів, де ВСШ менше ніж 3,4 рази, якість передавання корисної інформації суттєво погіршується, бо це значення фактично відповідає для BPSK модуляції $P_{BER} = 10^{-2}$ (рис. 1). Ефективне руйнування корисної інформації для BPSK модуляції відбувається для випадків, коли БПЛА знаходиться від НКУ на більших відстанях, ніж віддалення ПП від НКУ. У той же час, навіть коли БПЛА знаходиться безпосередньо над ПП, відстань від БПЛА до НКУ буде завжди більшою, ніж відстань від ПП до НКУ, і тому відбуватиметься ефективне руйнування інформації ($q_n < 5,3$ дБ). Якщо сигнал ПП буде потрапляти у першу бічну пелюстку діаграми спрямованості антени “INDELA-RM 5800”, то результати, наведені в табл. 3, зменшаться удвічі. Якщо ж ПП працюватиме в режимі шумової загороджувальної перешкоди ($m = 0,1$), то для досягнення значень, наведених у табл. 3, доведеться збільшити потужність передавача до 100 Вт.

Як показали результати розрахунків для випадку $R_{m} = R_{БПЛА} = 1$ км, наведених у табл. 4, цієї потужності також цілком достатньо навіть при використанні шумової загороджувальної перешкоди, щоб ефективно зруйнувати корисну інформацію в радіолінії з багаторівневою маніпуляцією. Збільшення потужності передавача ПП до 150 Вт зменшує значення ВСШ на вході приймача НКУ до значень, за яких для всіх видів маніпуляції $P_{BER} \leq 10^{-2}$ (рис. 1).

Таблиця 4

Розрахункові значення ВСШ на вході приймача НКУ при використанні загороджувальної перешкоди для різних видів модуляції

Вид модуляції	BPSK		16QAM		64QAM	
	P_{en} , Вт	q_n , дБ	P_{en} , Вт	q_n , дБ	P_{en} , Вт	q_n , дБ
P_{en} , Вт	100	150	100	150	100	150
q_n , дБ	5,3	3,6	11,4	9,6	13	11,5

Висновки. У статті оцінено можливості руйнування корисної інформації, що передається радіолінією БПЛА – НКУ в частотному діапазоні 5,2–5,8 ГГц, шляхом активної радіоелектронної протидії. Проведені розрахунки показали, що шумова загороджувальна перешкода забезпечує ефективне руйнування корисної інформації, яка передається з борту БПЛА типовою радіолінією з багаторівневою маніпуляцією, при потужності передавача ПП 150 Вт і неспрямованій антені.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Застосування безпілотних літальних апаратів у воєнних конфліктах сучасності : моногр. / Ю. К. Зіатдінов, М. В. Куклінський, С. П. Мосов та ін. ; ред. С. П. Мосова. – К. : Видавн. дім «Києво-Могилян. акад.», 2013. – 247 с.
2. Мосов С. П. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития : моногр. / С. П. Мосов. – К. : Изд. дом. «Румб», 2008. – 160 с.
3. Теорія і техніка протидії безпілотним засобам повітряного нападу. Застосування та перспективи розвитку. Виявлення малопомітних засобів повітряного нападу / В. І. Ткаченко, Ю. Г. Даник, Г. А. Дробаха та ін. – Х. : ХВУ, 2002. – 220 с.
4. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учеб. / Д. М. Сазонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 432 с.
5. Система приема-передачи данных «INDELA-ATA 5800+» [Электронный ресурс] / Independent development laboratory Inc. – Режим доступа : www.indelauav.com/product_ata5800.html.
6. Долуханов М. П. Распространение радиоволн : учеб. / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972. – 336 с.
7. Теорія і техніка протидії безпілотним засобам повітряного нападу / Ю. Г. Даник, Г. А. Дробаха, В. І. Карненко та ін. – Х. : ХВУ, 2002. – 260 с.
8. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь / Дж. Спилкер ; пер. с англ. под ред. В. В. Маркова. – М. : Связь, 1979. – 592 с.

9. Радиотехнические системы : учеб. для вузов / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высш. школа, 1990. – 496 с.
10. Радиорелейные и спутниковые системы передачи : учеб. / А. С. Немировский, О. С. Данилович, Ю. И. Маримонт и др. ; под общ. ред. А. С. Немировского. – М. : Радио и связь, 1986. – 392 с.
11. Кантор Л. Я. Спутниковая связь и вещание : справочник / Л. Я. Кантор. – М. : Радио и связь, 1988. – 345 с.
12. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / К. Феер ; пер. с англ. под ред. В. И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.

Подано 29.09.2015

А. В. Андреев, А. Р. Рыхальский

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСКАЖЕНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ С БОРТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ АКТИВНОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

В статье проведена оценка возможности разрушения (искажения) передаваемой полезной информации с борта беспилотных летательных аппаратов в частотном диапазоне 5,2–5,8 ГГц путем активного радиоэлектронного противодействия. Предложены значения мощности передатчика – постановщика помех для эффективного искажения полезной информации при разных видах модуляции сигнала.

O. V. Andreiev, O. R. Rykhalsky

STUDY ON THE POSSIBILITY OF DESTROYING THE USEFUL INFORMATION TRANSFERRED FROM THE BOARD OF UNMANNED AERIAL, VEHICLES BY ACTIVE ELECTRONIC COUNTERMEASURES

The article evaluates the possibility of destruction of useful information, transmitted from the Board of UAV in the frequency range of 5,2–5,8 GHz by active electronic countermeasures. The proposed power value transmitter director obstacles to the effective destruction of useful information in different types of modulation.