УДК 623.746:621.396.4

В. Д. Бондарчук, І. В. Первак

ЗАСТОСУВАННЯ СТРИБКОПОДІБНОЇ ЗМІНИ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ КАНАЛУ КЕРУВАННЯ БпЛА

Анотація. *Розглянуто проблему втрати керування малим БпЛА, коли канал керування працює на одній постійній частоті й потрапляє під дію радіоелектронного придушення. Запропоновано застосовувати стрибкоподібну зміну частоти, за якої передавач і приймач за узгодженою послідовністю швидко змінюють робочий канал. Описано принцип дії, умови, за яких метод ефективний, порядок налаштування та додаткові заходи, що підвищують стійкість каналу. Зазначено обмеження методу й напрями польової перевірки.*

Ключові слова: *БпЛА, канал керування, стрибкоподібна зміна частоти, завадостійкість, радіоелектронне придушення.*

Abstract. *The paper considers the problem of losing control of a small UAV when its control link works on a single fixed frequency and falls under electronic jamming. Frequency hopping is proposed, in which the transmitter and the receiver quickly change the operating channel according to an agreed sequence. The principle of operation, the conditions under which the method is effective, the setup procedure and additional measures that increase link stability are described. The limitations of the method and directions of field testing are indicated.*

Keywords: *UAV, control link, frequency hopping, jamming resistance, electronic jamming.*

Канал керування є найважливішою ланкою в роботі малого БпЛА. Через нього оператор передає команди, а апарат повідомляє свій стан. Якщо цей канал працює на одній постійній частоті, станції радіоелектронного придушення (РЕП) легко зосередити всю потужність у вузькій смузі навколо неї. Сигнал керування тоді тоне в завадах, апарат втрачає зв’язок з оператором і переходить в аварійний режим або падає. Крім того, постійну частоту легко виявити й відстежувати, тож противник може підготувати придушення заздалегідь. Таким чином, проблема полягає в тому, що вся стійкість каналу залежить від однієї частоти, яку легко знайти й заглушити.

Суть запропонованого рішення полягає в стрибкоподібній зміні частоти. Робочий діапазон ділять на багато каналів, а передавач і приймач швидко й одночасно переходять з одного каналу на інший за послідовністю, яку знають лише вони. Для сторонньої станції ця послідовність виглядає випадковою. Щоб придушити такий канал, противник має або створювати завади в усьому діапазоні одночасно, або вгадати наступну частоту. У першому випадку потужність завад розподіляється по всіх каналах, і в кожному з них стає значно меншою, ніж у разі придушення однієї частоти. У другому випадку він змушений постійно запізнюватися, адже приймач уже перейшов на інший канал.

Ефективність методу залежить від швидкості змін частоти. За повільної зміни станція, яка слідкує за сигналом, може виявити поточний канал і встигнути його заглушити. За швидкої зміни, коли час перебування на каналі менший за час реакції такої станції, придушення втрачає сенс. Тому швидкість змін обирають із розрахунку на можливості противника, а також на здатність власної апаратури підтримувати синхронізацію. Саме канал керування для цього підходить найкраще: він передає небагато даних, тож короткі повідомлення легко розподілити по багатьох каналах, на відміну від відеоканалу, який потребує широкої смуги й для якого такий метод складніший.

Для надійної роботи передавач і приймач повинні бути синхронізовані за часом і мати однакову послідовність. Її формують із ключа, який записують в апарат і пульт до вильоту, а кожному розрахунку або групі апаратів призначають окремий ключ. Це дозволяє уникнути взаємних завад між власними БпЛА, які працюють в одному районі, та ускладнює для противника спробу підібрати послідовність. Якщо синхронізацію втрачено, приймач переходить у режим пошуку й повторно входить у зв’язок за службовими сигналами. Короткі збої на окремих каналах компенсують завадостійким кодуванням і повторенням важливих команд, щоб удар завад по одному каналу не призводив до втрати команди.

Додатково використовують адаптивний режим. Система постійно оцінює якість кожного каналу й тимчасово виключає ті, де завади тримаються довго. Так послідовність використовує лише чисті частоти, а втрати зменшуються. Порядок застосування методу такий: перед вильотом завантажують ключ і перевіряють синхронізацію на землі, у польоті стежать за показниками якості зв'язку, а при їх погіршенні система виключає уражені канали та повідомляє оператора. Якщо зв'язок усе ж втрачено, діє заздалегідь налаштований аварійний режим апарата. Після польоту дані про якість каналів заносять у журнал, щоб уточнювати налаштування.

Метод має й обмеження. Він потребує ширшого діапазону й складнішої апаратури, ніж канал на одній частоті, а швидка зміна каналів додає невелику затримку в передачі команд. Якщо противник має достатньо потужності, щоб заглушити весь діапазон одночасно, стрибкоподібна зміна частоти сама не допоможе. Тому її поєднують з іншими заходами: напрямленими антенами, ретрансляторами, а також резервним каналом і аварійним режимом апарата. Перевірку запропонованого підходу доцільно провести в польових умовах, порівнявши частку втраченого зв'язку для каналу на одній частоті й з її стрибкоподібною зміною.

Практичне значення підходу полягає в тому, що його можна впровадити в підрозділі на рівні налаштувань наявної апаратури, не змінюючи порядку роботи оператора. Достатньо визначити діапазон, узгодити ключі для груп апаратів і заздалегідь перевірити їх на землі. Для цього доцільно скласти коротку пам'ятку з порядком завантаження ключів, перевірки синхронізації та дій оператора при погіршенні якості каналу. Під час навчань оператори мають відпрацювати ситуації, коли частина каналів виключена через завади, щоб не сприймати зниження дальності як несправність апарата. Накопичені в журналі дані про якість каналів дозволяють поступово підбирати діапазони й налаштування, які найкраще працюють у конкретному районі.

Таким чином, застосування стрибкоподібної зміни частоти усуває головну слабкість каналу на одній частоті, змушує противника розподіляти потужність завад на весь діапазон або постійно запізнюватися й підвищує ймовірність збереження керування БПЛА. Метод придатний саме для каналу керування, не потребує великої смуги й може поєднуватися з іншими способами захисту. Подальша робота полягає в польовому визначенні оптимальної швидкості змін частоти та кількості каналів для конкретного обладнання.

Список використаних джерел:

1. Torrieri D. *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*. 4th ed. Cham: Springer, 2018. 654 p.
2. Simon M. K., Omura J. K., Scholtz R. A., Levitt B. K. *Spread Spectrum Communications Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2002. 1248 p.
3. Pirayesh H., Zeng H. Jamming attacks and anti-jamming strategies in wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, No. 2. P. 767–809.
4. Poisel R. A. *Modern Communications Jamming Principles and Techniques*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2011. 592 p.

Бондарчук Володимир Дмитрович *– курсант інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61009, e-mail: vovabondarchuk103@gmail.com.*

Первак Ігор Володимирович *– курсант інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, інд. 61009, e-mail: pervakigor9@gmail.com.*

Bondarchuk Volodymyr Dmytrovych *– cadet from the Faculty of Aviation Engineering of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St. 77/79, Ind 61009, e-mail: vovabondarchuk103@gmail.com.*

Pervak Ihor Volodymyrovych *– cadet from the Faculty of Aviation Engineering of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St. 77/79, Ind 61009, e-mail: pervakigor9@gmail.com.*