

ОЦІНКА ЖИВУЧОСТІ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ БПЛА В УМОВАХ ВПЛИВУ НАВМИСНИХ ТА НЕНАВМИСНИХ ЗАВАД

Гетьман О.В., Кайденко М.М., Роскошний Д.В.

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

E-mail: kkk610@ukr.net

EVALUATION OF THE SURVIVABILITY OF THE UAV COMMUNICATION CHANNEL UNDER THE INFLUENCE OF INTENTIONAL AND UNINTENTIONAL INTERFERENCE

The paper presents estimates of the survivability of the control channel of an unmanned aerial vehicle under the influence of deliberate interference on it. It is shown that the survivability of a control channel built using two communication channels in two frequency bands increases significantly. Formulas for assessing survivability are given for various options for influencing the UAV control channel.

В останні роки застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) все більше зростає для різних застосувань як у військових цілях, так і в цивільних. Це зростання безперервно продовжуватиметься за рахунок удосконалення технологій, що призведе до створення більш дешевих та інтелектуальних систем БПЛА. Однак все більше поширення застосування БПЛА збільшує й проблеми безпеки. В даний час пов'язані з БПЛА дослідження з протидії загрозам кібербезпеки зосереджені в основному на подавленні сигналів GPS та спуфінгу, але ігноруються атаки на елементи управління та канали передачі даних. При цьому канал передачі даних, який визначає живучість безпілотного апарату як з точки зору виконання місії, так і з точки зору безпеки самого апарату, є найбільш вразливим з точки зору кібератак на БПЛА. Пробіл у дослідженнях атак на канал передачі даних викликає занепокоєння, оскільки оператор може бачити, як БПЛА збивається з курсу через атаку на канал управління, але не має можливості виявити цю атаку та протидіяти їй.

Живучість безпілотного апарату з точки зору управління ним в першу чергу залежить від живучості системи зв'язку та управління, вихід з ладу якої призводить до повної втрати управління апаратом та, як наслідок, до можливої втрати самого апарату.

Живучість каналу зв'язку визначається як здатність зберігати робочі параметри в умовах впливу на нього різноманітних дестабілізуючих факторів у вигляді ненавмисних і навмисних завад. Способи боротьби з ненавмисними завадами широко відомі [1,2], одним з таких способів є адаптивна модуляція та кодування [3]. Опосередковано живучість може бути визначена через ймовірність бітової помилки, або ймовірність помилки в блоці даних. У випадку навмисних завад такий підхід визначення живучості не може бути застосований в силу самої природи навмисної завади. Більш точним підходом

буде визначення живучості як ймовірність збереження робочих властивостей каналу управління при впливі на нього навмисних завад.

В роботах [4,5] було запропоновано архітектуру системи зв'язку та управління малогабаритного БПЛА, яка покликана ефективно протидіяти впливу навмисних завад та базується на побудові каналу управління з використанням двох каналів зв'язку в двох діапазонах частот. Для запропонованої в цих роботах архітектури системи зв'язку живучість може бути визначена з використанням формули складної ймовірності в залежності від настання подій. В ній враховуються наступні змінні, з врахуванням того що на канал управління БПЛА можуть діяти навмисні завади глушення каналу, чи імітаційні завади: ймовірність роботи системи радіопротидії у діапазонах частот, які використовуються для системи зв'язку БПЛА; ймовірність того, що є дві системи радіопротидії, які можуть працювати одночасно; ймовірність того, що дві системи радіопротидії можуть працювати не тільки одночасно, але і бути синхронізовані за часом; ймовірність правильного виявлення та помилкової тривоги за наявності навмисних імітаційних завад.

Коефіцієнт живучості каналу управління БПЛА у разі використання одного каналу зв'язку та впливу на нього лише ненавмисних завад у припущенні, що помилки (бітові, чи пакетні) призводять до руйнування каналу, може бути визначений як:

$$K_{liv} = 1 - P_{ber}; \quad (1)$$

де: K_{liv} - коефіцієнт живучості каналу управління; P_{ber} - ймовірність бітової (пакетної) помилки в каналі зв'язку.

Коефіцієнт живучості каналу управління БПЛА у випадку використання двох каналів зв'язку та впливу на них лише ненавмисних завад може бути визначений як:

$$K_{liv} = 1 - P_{ber_chan1} P_{ber_chan2}; \quad (2)$$

де: P_{ber_chan1} та P_{ber_chan2} - ймовірності бітової (пакетної) помилки в каналах, події незалежні.

Коефіцієнт живучості каналу управління БПЛА у випадку використання одного каналу зв'язку та впливу на нього як ненавмисних завад, так і навмисних завад глушення може бути визначений як:

$$K_{liv} = 1 - \frac{P_{ber}}{P_{jamm}}; \quad (3)$$

де: P_{jamm} - ймовірність придушення каналу зв'язку завадою глушення.

Коефіцієнт живучості каналу управління БПЛА у випадку використання двох каналів зв'язку та впливу на них як ненавмисних завад, так і навмисних завад глушення від двох незалежних систем радіопротидії може бути визначений як:

$$K_{liv} = 1 - \frac{P_{ber_chan1}}{P_{jamm_chan1}} \cdot \frac{P_{ber_chan2}}{P_{jamm_chan2}}; \quad (4)$$

де: P_{jamm_chan1} , P_{jamm_chan2} - ймовірності придушення окремих каналів зв'язку завадою глушення, чи імітаційною енергетичною завадою, події незалежні.

Коефіцієнт живучості каналу управління БПЛА у випадку використання двох каналів зв'язку та впливу на них як ненавмисних завад, так і навмисних завад імітації від систем радіопротидії може бути визначений як:

$$K_{liv} = 1 - \frac{P_{ber_chan1}}{P_{im_chan1}} \cdot \frac{P_{ber_chan2}}{P_{im_chan2}} \cdot P_{sync}; \quad (5)$$

де: P_{im_chan1} , P_{im_chan2} - ймовірності підміни даних в каналах зв'язку завадою імітації, події незалежні; P_{sync} - ймовірність синхронної роботи системи постановки завад імітації в обох каналах зв'язку.

Як видно з виразів (4,5) живучість каналу управління БПЛА, побудованого з використанням двох каналів зв'язку в двох діапазонах частот, при впливі на нього навмисних завад буде істотно вищою порівняно з традиційною побудовою управління. У разі застосування складної системи радіопротидії, що працює одночасно у двох діапазонах частот з можливістю постановки синхронної імітаційної перешкоди, живучість каналу управління знизиться. При цьому слід враховувати, що синхронність роботи передбачає перехоплення даних в обох каналах зв'язку, їх підміну та синхронізацію за часом передачі. Однак ймовірність застосування таких систем для протидії малогабаритним БПЛА, особливо цивільного застосування, залишається дуже низькою. Крім того використання двох діапазонів частот крім підвищення живучості каналу управління БПЛА у разі впливу на нього навмисних завад забезпечує ще й більшу стійкість каналу до завмирань внаслідок багатопромовості [6], збільшуючи таким чином живучість каналу управління при впливі на нього ненавмисних завад.

Література

1. B. Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications, Second Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
2. A. Goldsmith, Wireless Communications, U.K., Cambridge:Cambridge Univ. Press, 2005.
3. N. Kaydenko, "Adaptive modulation and coding in a broadband wireless access systems", 23th International Crimean Conference on "Microwave and Telecommunication Technology", CriMico'2013. Sevastopol, on September 8-13, 2013. - P. 275-276.
4. Kaidenko M., Kravchuk S. (2021) Autonomous Unmanned Aerial Vehicles Communications on the Base of Software-Defined Radio. In: Ilchenko M., Uryvsky L., Globa L. (eds) Advances in Information and Communication Technology and Systems. MCT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 152. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0_16
5. M. M. Kaidenko and S. O. Kravchuk, "Anti-Jamming System for Small Unmanned Aerial Vehicles," 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/APUAVD53804.2021.9615403.
6. Palestini, C.: Fighting UAVs: Finding the Magic Solution. NATO Review, 16 December (2020). <https://www.nato.int/docu/review/ru/index.html>.