

О. О. Бондаренко, В. В. Клименко, Р. В. Березенський

АНАЛІЗ ВПЛИВУ АКТИВНИХ ШУМОВИХ ЗАВАД НА ЯКІСТЬ КОРИСНОГО СИГНАЛУ В БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Анотація. Розглянуто вплив активних шумових завад різних видів на стійкість корисного сигналу, що передається каналом управління безпілотних систем спостереження. Описано прояви погіршення якості корисного сигналу на фізичному, кодовому та системному рівнях. Узагальнено дані щодо радіоелектронного впливу на канали управління в безпілотних літальних апаратах за досвідом бойових дій. Запропоновано сукупність показників для кількісного оцінювання якості корисного сигналу в умовах впливу активних шумових завад. Визначено шляхи мінімізації впливу завад: розширення спектра та завадостійка модуляція, адаптивне кодування, рознесення приймання та адаптивні антенні решітки, цифрове відновлення зображення, адаптивне керування потужністю передавача та спрямовані антени.

Ключові слова: безпілотні системи спостереження, активні шумові завади, стійкість корисного сигналу, завадостійкість, радіоелектронна боротьба.

Annotation. This paper examines the impact of various types of active noise jamming on the robustness of the useful signal transmitted over the control channel of unmanned surveillance systems. It describes the manifestations of useful signal quality degradation at the physical, codec, and system levels. Drawing on combat experience, the paper summarizes data on electronic attack against the control channels of unmanned aerial vehicles. A set of indicators is proposed for the quantitative assessment of useful signal quality under active noise jamming. The paper identifies ways to minimize the impact of jamming, namely spread spectrum and jam-resistant modulation, adaptive coding, diversity reception and adaptive antenna arrays, digital image restoration, adaptive transmitter power control, and directional antennas.

Keywords: unmanned surveillance systems, active noise jamming, useful signal robustness, jamming resistance, electronic warfare.

Ефективність застосування безпілотних систем спостереження (далі – БСС) безпосередньо залежить від якості корисного сигналу в сенсі його стійкості до впливу активних шумових завад. Саме вплив засобів радіоелектронної боротьби на канал управління безпілотними системами спостереження погіршує якість(стійкість) корисного сигналу, що призводить до зниження ефективності таких систем.

Актуальність проблеми адаптації БСС до умов сучасного застосування засобів радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) підтверджується результатами застосування безпілотних систем в мультимодальному бойовому середовищі, про що свідчать дані Королівського об'єднаного інституту оборонних досліджень. [1, с. 14–15].

Як правило БСС управляють з пунктів управління з використанням супутникового каналу чи іншими каналами управління. Інтенсивність застосування БСС з кожним етапом бойових дій збільшується і їх роль на тактичному рівні особливо значима, а оптичний спосіб спостереження є основним джерелом розвідувальних даних на тактичному рівні. [1, с. 18].

Водночас вплив засобів РЕБ, як своїх так і противника на канали управління БСС стає майже цілодобовим в зоні дій тактичних підрозділів. Така радіоелектронна обстановка охоплює всю зону бойових дій, що призводить до придушення каналів управління. В той же час більшість технічних засобів, що задіяні в цій зоні мають електронні блоки управління особливо це стосується роботизованих комплексів. [1, с. 18].

За оцінкою від 60 до 80 % українських ударних БпЛА керованих оператором не досягають цілі, а радіоелектронна боротьба разом із погодними умовами протягом тривалих проміжків часу істотно обмежує їх застосування [1, с. 10], за винятком керування безпілотними системами на оптико волокні, але їхнє застосування обмежується дальністю їх використання, що становить близько 10 км [1, с. 10], тоді як розвідувальні завдання ставлять на глибину до 40 км і далі [1, с. 15]. Тому для БСС забезпечення стійкості каналу управління в оптичному

діапазоні є одним із шляхів ефективності функціонування таких систем в сучасних умовах мультимодального бойового середовища.

Метою дослідження є аналіз впливу активних шумових завад різних видів на якість корисного сигналу БСС.

За способом формування активні шумові завади поділяють на три види. Загороджувальні завади мають широкий спектр і перекривають увесь робочий діапазон приймача, тому рівномірно знижують відношення сигнал-шум (SNR) у всій смузі. Направлені завади зосереджені на конкретній несучій частоті чи каналі й повністю блокують його за меншої, ніж у загороджувальних, випромінюваної потужності [2, с. 457–458]. Динамічна завада з високою швидкістю послідовно перебирають діапазон частот і спричиняють періодичні короточасні розриви зв'язку.

Вплив шумових завад на стійкість корисного сигналу проявляється на трьох рівнях. На фізичному рівні знижується відношення сигнал-шум і зростає коефіцієнт бітових помилок (BER). В аналоговому відеоканалі це відразу помітно як шум на зображенні, а сильна завада призводить до втрати кадрової синхронізації. У цифровому відеоканалі помилки проявляються на рівні кодування, з'являються блокові ефекти, розмиваються контури, випадають окремі кадри. У кодексах H.264/H.265 помилка у втраченому опорному (I-) кадрі поширюється на наступні різниці (P/B-) кадри аж до надходження нового опорного кадру [3]. На системному рівні зростає затримка відеопотоку, а коли рівень завади перевищує поріг відносно корисного сигналу, відеозв'язок повністю втрачається.

Для кількісної оцінки стійкості корисного оптичного сигналу в умовах активних шумових завад адитивно поєднуються показники каналу та показники зображення. До перших належать відношення сигнал-шум (SNR), відношення сигнал-(завада + шум) (SINR) і коефіцієнт бітових помилок (BER) [2, с. 458]. До других належать пікове відношення сигнал-шум зображення (PSNR) та індекс структурної подібності (SSIM). Разом вони дають змогу порівнювати ступінь погіршення якості зображення за різних видів і потужностей завад. Слід враховувати, що PSNR і SSIM потребують еталонного зображення, тому їх застосовують під час моделювання та випробувань, а не в бойових умовах у реальному часі.

На основі проведеного аналізу можна виокремити п'ять шляхів мінімізації впливу активних шумових завад на якість корисного сигналу БСС.

По-перше, доцільно застосовувати розширення спектра сигналу (DSSS, FHSS) та завадостійкі методи модуляції, зокрема OFDM з адаптивним розподілом частот. Такі методи підвищують завадостійкість каналу, і для його ефективного придушення противником доводиться значно нарощувати потужність завади [2, с. 459–460, 463].

По-друге, варто використовувати завадостійке кодування з прямим виправленням помилок (FEC) та адаптивні відеокодеки, які змінюють швидкість відеопотоку і ступінь стиснення відповідно до стану каналу. Це зменшує кількість втрачених кадрів і зберігає прийнятну якість зображення за зниженого відношення сигнал-шум [2, с. 457; 3].

По-третє, ефективним є просторове та частотне рознесення приймання, за якого сигнал приймають кількома антенами або одночасно в кількох частотних піддіапазонах. Завдяки цьому корисний сигнал можна відновити навіть тоді, коли один із каналів приймання повністю придушено. Просторову обробку підсилюють адаптивні антенні решітки на пункті управління, які формують провал діаграми спрямованості в напрямку на джерело завади [2, с. 464–465]. Можливості такої решітки обмежені: вона придушує не більше $N - 1$ завад, де N – кількість її елементів, і гірше працює, коли завада надходить з напрямку, близького до напрямку надходження корисного сигналу [4].

По-четверте, на наземному пункті управління слід впроваджувати цифрову обробку прийнятого відеопотоку із застосуванням штучних нейронних мереж, зокрема для усунення шуму, відновлення втрачених кадрів і підвищення різкості [5]. Це дає змогу частково компенсувати втрати якості, яких не вдалося уникнути на попередніх етапах.

По-п'яте, доцільно поєднувати адаптивне керування потужністю передавача зі спрямованими антенами, що мають вузьку діаграму спрямованості. Адаптивне керування утримує потужність на рівні, достатньому для заданої якості приймання, а вузька діаграма зосереджує випромінювання в напрямку на пункт управління [6]. Це підвищує енергетичний

потенціал каналу і водночас зменшує демаскуючі ознаки БСС. Останнє важливо, оскільки пеленгування випромінювань використовують для наведення розвідувальних БпЛА [1, с. 15].

Висновки. Активні шумові завади знижують якість корисного сигналу БСС на фізичному, кодовому та системному рівнях, а характер погіршення якості зображення залежить від виду завади. Досвід бойових дій показує, що канали зв'язку БСС, зокрема відеоканали, є постійним об'єктом радіоелектронного впливу. Жоден із розглянутих методів окремо не захищає від усіх видів завад, тому їх слід поєднувати, розширення спектра та завадостійку модуляцію, адаптивне кодування, рознесення приймання з адаптивними антенними решітками, цифрове відновлення зображення, а також адаптивне керування потужністю передавача разом зі спрямованими антенами. Такий комплекс підвищує завадостійкість корисного сигналу в умовах активної радіоелектронної протидії.

Список використаних джерел:

1. Watling J., Reynolds N. Tactical Developments During the Third Year of the russo–Ukrainian War. London : Royal United Services Institute, 2025. 24 p. URL: <https://static.rusi.org/tactical-developments-third-year-russo-ukrainian-war-february-2205.pdf>
2. Крючкова Л. П., Ворохоб Н. О. Адаптивні методи протидії активним шумовим завадам. Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. № 2 (30). С. 456–473. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.987>.
3. Stockhammer T., Hannuksela M. M., Wiegand T. H.264/AVC in wireless environments. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2003. Vol. 13, No. 7. P. 657–673. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2003.815167>.
4. Al Ka'bi A. H. Steered beam adaptive antenna arrays. Antenna Systems / ed. by H. Al-Rizzo, S. Abushamleh. London : IntechOpen, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.100168>.
5. Wang X., Chan K. C. K., Yu K., Dong C., Loy C. C. EDVR: video restoration with enhanced deformable convolutional networks. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2019. arXiv:1905.02716, DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2019.00247>.
6. Споришев К. О., Іванов Б. В. Метод просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління безпілотними літальними апаратами. Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2025. № 2 (46). С. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2025/2/46/352583>.

Бондаренко Олександр Олегович – ад'юнкт штатного науково-організаційного відділу Військової академії (м. Одеса), м. Одеса, e-mail: sashoobondik@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8751-0374>.

Клименко Віктор Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри організації автотранспортного забезпечення та автомобільної підготовки Військової академії (м. Одеса), м. Одеса, e-mail: viktorklymenko1971@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8073-4404>.

Березенський Руслан Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації автотранспортного забезпечення та автомобільної підготовки Військової академії (м. Одеса), м. Одеса, e-mail: Ruslan3438@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1778-816X>.

Oleksandr Bondarenko – Postgraduate Student, Military Academy (Odesa), Odesa, e-mail: sashoobondik@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8751-0374>.

Viktor Klymenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Organization of Motor Transport Support and Automotive Training, Military Academy (Odesa), Odesa, e-mail: viktorklymenko1971@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8073-4404>.

Ruslan Berezenskyi - Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Department of Organization of Motor Transport Support and Automotive Training, Military Academy (Odesa), Odesa, e-mail: Ruslan3438@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1778-816X>.