

УДК 519.7+004.8

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-1>**Олег ВІЛІГУРСЬКИЙ**

старший викладач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського,
Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл.,
Україна, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3763-2577>

Бібліографічний опис статті: Вілігурський, О. (2025). Деякі способи протидії системи безпілотних літальних апаратів засобам радіоелектронної боротьби. *Фізика та освітні технології*, 2, 3–7, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-1>

ДЕЯКІ СПОСОБИ ПРОТИДІЇ СИСТЕМИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗАСОБАМ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

Однією з серйозних проблем, які з часу початку сучасної російсько-української війни (від 2014 року) доводиться вирішувати постійно, є протидія засобам радіоелектронної боротьби (РЕБ). Оскільки має місце постійне вдосконалення як літальних апаратів (пілотованих і безпілотних), так і засобів боротьби з ними, то ця проблема найближчими роками не втрачатиме актуальності. Основні способи протидії: криптографічний захист сигналу, частотна агрегація, використання фізичних бар'єрів, автономні режими польоту (з закриттям усіх радіоканалів зв'язку з оператором), створення унікального програмного забезпечення для БПЛА (Шкітов, 2024).

У цій роботі буде розглядається один з варіантів протидії засобам РЕБ, який має на меті зменшити вразливість перед цими засобами не окремого безпілотного літального апарата (БПЛА), а належним чином сконфігурованої системи з багатьох БПЛА, яку можна розглядати як «рій дронів» чи «хмару дронів». Пропонується система, де окремі бойові БПЛА за допомогою радіосигналів або оптичного зв'язку керуються центральним дроном. Зв'язок з оператором (через електромагнітне випромінювання у радіо-діапазоні чи через оптоволокну) має лише центральний дрон. У межах «рою» характерні відстані для передачі сигналу є малими (порядку метрів), тож передача сигналів між літальними апаратами є менш вразливою, ніж у випадку зв'язку безпосередньо з оператором. Допускається також такий варіант обміну сигналами, коли літальні апарати об'єднані у мережу; при цьому віддалені елементи «рою» можуть не бути безпосередньо пов'язані з центральним апаратом. Тобто може мати місце щось на зразок двовимірної кристалічної структури із взаємодією найближчих (чи близьких) сусідів. Тривимірна структура видається менш доцільною з точки зору ефективності застосування засобів враження окремих БПЛА, але може бути доречною, якщо на дрони-сателіти покладати також функцію захисту центрального дрона. Способи захисту каналів обміну інформацією між центральним дроном і оператором у роботі не розглядаються.

Ключові слова: електродинаміка, теорія випромінювання, безпілотні літальні апарати, радіоелектронна боротьба.

Oleh VILIHURSKYI

Senior Teacher at the Department of Theoretical and Computer Physics named after A.V. Svidzynskyi,
Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3763-2577>

To cite this article: Vilihurskyi, O. (2025). Deiaiki sposoby protydii systemy bezpilotnykh litalnykh aparativ zasobam radioelektronnoi borotby [Some methods of countering the effects of unmanned aircraft systems against electronic warfare devices]. *Physics and Educational Technology*, 2, 3–7, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-1>

SOME METHODS OF COUNTERING THE EFFECTS OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS AGAINST ELECTRONIC WARFARE DEVICES

One of the serious problems that has had to be solved constantly since the beginning of the modern Russian-Ukrainian war (since 2014) is the counteraction to electronic warfare (EW) means. Since there is a constant improvement of both aircraft (manned and unmanned) and means of combating them, this problem will not lose its relevance in the coming years. The main methods of counteraction: cryptographic signal protection, frequency aggregation, the use of physical barriers, autonomous flight modes (with the closure of all radio channels of communication with the operator), the creation of unique software for UAVs (Shkitov, 2024). This paper will consider one of the options for countering EW means, which aims to reduce the vulnerability to these means not of a single unmanned aerial vehicle (UAV), but of a properly configured system of many UAVs, which can be considered as a "swarm of drones" or "cloud of drones". A system is proposed where individual combat UAVs are controlled by a central drone using radio signals or optical communication. Only the central drone has communication with the operator (via electromagnetic radiation in the radio range or via optical fiber). Within the "swarm", the typical distances for signal transmission are small (of the order of meters), so signal transmission between aircraft is less vulnerable than in the case of direct communication with the operator. A variant of signal exchange is also possible when the aircraft are combined into a network; in this case, remote elements of the "swarm" may not be directly connected to the central device. That is, something like a two-dimensional crystalline structure with the interaction of the nearest (or close) neighbors may take place. A three-dimensional structure seems less appropriate from the point of view of the effectiveness of using means of impressing individual UAVs, but may be appropriate if the satellite drones are also assigned the function of protecting the central drone. Methods of protecting information exchange channels between the central drone and the operator are not considered in the work.

Key words: *electrodynamics, radiation theory, unmanned aerial vehicles, electronic warfare.*

Актуальність теми. Засоби РЕБ показують високу ефективність протидії дронам, які обмінюються даними з оператором по радіоканалах. Обмін даними через оптоволокну є не завжди доречним і має свої обмеження. Тож актуальним є питання пошуку нових варіантів протидії засобам РЕБ.

Метою статті є дослідження системи невеликих БПЛА, об'єднаних у своєрідну «хмару» чи «рій», які обмінюються даними не безпосередньо з оператором, як проміжну ланку використовують центральний дрон. Зрозуміло, що такий дрон повинен мати більш надійний засіб зв'язку з оператором, але для окремого БПЛА це організувати часто простіше, ніж дбати про протидію РЕБ для кожного бойового дрона.

Виклад основного матеріалу дослідження. Система великого числа відносно невеликих дронів з невеликим озброєнням має ряд переваг перед одним літальним апаратом з більшими розмірами і більшою вогневою міццю. Передусім тут йдеться про те, що втрата одного чи кількох БПЛА може залишити боєздатним рій в цілому, тоді як будь-яке пошкодження великого літального апарату, зазвичай, призводить до його втрати. Але у окремо взятого дрона з малими розмірами є суттєвий програш у порівнянні з великим літальним апаратом: неможливість встановлення складної апаратури, яка могла б протидіяти засобам РЕБ (Іваненко, 2023).

Коли йдеться про радіоелектронну боротьбу, слід розуміти, що йдеться про електромагнітне випромінювання з певним діапазоном довжин хвиль, характерними відстанями, де це випромінювання є ефективним, про передаючі і приймаючі антени тощо. Одним словом, це в значній мірі питання електродинаміки.

Пропонується до подальшого вивчення така система, яка складається з центрального дрона, який має зв'язок з оператором напряму (чи належним чином максимально захищеним електромагнітним випромінюванням чи за допомогою оптоволокну), а також з системи дронів-сателітів, які знаходяться на невеликій відстані від центрального і обмінюються електромагнітними сигналами лише з ним. Геометрія системи, в принципі, може бути просторовою, але обмежимося випадком, коли система дронів розміщена в горизонтальній площині. Принаймні, з міркувань бойового застосування це видається більш доречним, ніж розміщення дронів у просторі, на різних висотах. Тоді найбільш доцільними є два найбільш прийнятних способи розміщення дронів: по вузлах квадратної ґратки (рис. 1) і по вузлах трикутної ґратки (рис. 2).

Позначимо відстань між найближчими дронами-сусідами через a (параметр ґратки), число дронів у системі – N , а характерні лінійні розміри системи – $2L$. При цьому вважаємо, що дрони розміщуються в межах кола, радіусу L .

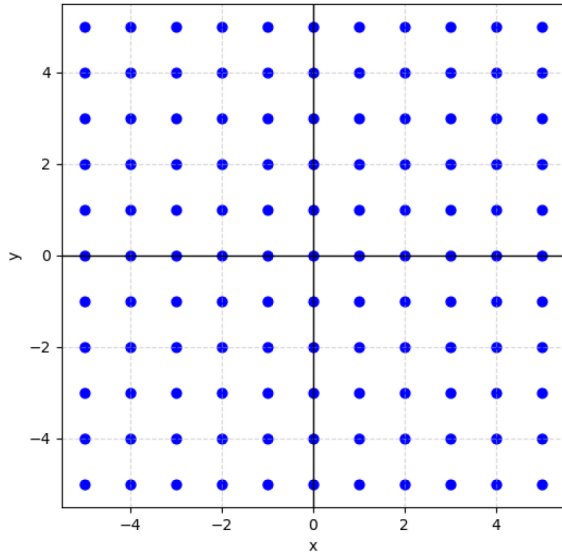


Рис. 1. Варіант розташування системи дронів по вузлах квадратної ґратки

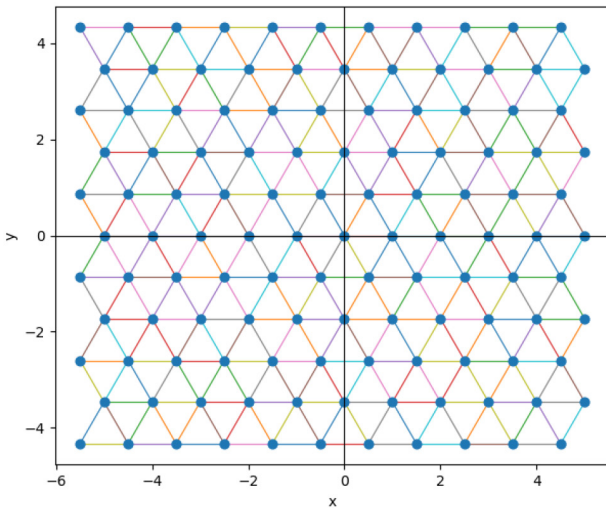


Рис. 2. Варіант розташування системи дронів по вузлах трикутної ґратки

У випадку конфігурації, показаної на рис. 1, величини a , N і L пов'язані так:

$$N_1 \approx \frac{\pi L^2}{a^2}. \quad (1)$$

Ця формула впливає з оцінки числа вузлів квадратної ґратки з параметром a , які попадають в межі кола, радіусу L .

У випадку конфігурації, показаної на рис. 2, відповідний зв'язок виражається формулою:

$$N_2 \approx \frac{2\pi L^2}{\sqrt{3}a^2}. \quad (2)$$

(число вузлів трикутної ґратки з параметром a , які попадають в межі кола, радіусу L).

Зауважимо, що N_2 приблизно в 1,15 разів більше за N_1 . Тож трикутна ґратка може бути більш доцільною, оскільки при тій самій максимальній віддаленості L від центрального дрона міститиме більше число дронів-сателітів.

Зрозуміло, що таке рішення не потребує потужних антен для дронів-сателітів. З огляду на те, що у хвильовій зоні випромінювання густина потоку енергії електромагнітного поля залежить від відстані r до системи, яка випромінює (антени) за законом $1/r^2$, то зрозуміло, при достатньо компактних розмірах системи дронів можна підібрати таку потужність сигналу зв'язку, щоб сигнал зв'язку між центральним дроном і дронами-сателітами суттєво переважав потужність потенційного засобу РЕБ.

Є ще один фізичний механізм, який дозволяє організувати більш захищений перед засобами РЕБ спосіб зв'язку між дронами. Залежність густини потоку електромагнітного випромінювання від відстані у формі $1/r^2$ має місце для хвильової зони випромінювання (зона Фраунгофера). Тут ми маємо справу з дипольним випромінюванням (Jackson, 1998).

Але поряд з цим, для антени можна виділити реактивну ближню зону де амплітуди електричного і магнітного полів спадають з відстанню за законом $E, H \sim 1/r^3$, і радіаційну ближню зону (зону Френеля), де має місце змішана залежність амплітуд поля від відстані (Balanis, 2016).

Якщо позначити характерні розміри антени через D , а довжину хвилі через λ , то оцінка для межі реактивної ближньої зони є такою:

$$r < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{L}}. \quad (3)$$

А межа початку дальньої зони:

$$r > \frac{2D^2}{L}. \quad (4)$$

Можна зробити оцінку межі початку дальньої зони для робочих частот передачі відео/управління $\sim 2,4$ ГГц – $5,8$ ГГц (довжини хвиль $\lambda \sim 0,052$ м – $0,125$ м) і розміру антени $D \approx 0,05$ м чи менше. Тоді бачимо, що відстані далекого поля починається приблизно з 10 см. Зрозуміло, що це надто мала величина для практичної реалізації, але якщо змінити діапазон частот і (що більш дієво) розміри антени, цю відстань все ж можна збільшити до практичних значень (параметр

гратки a у формулах (1), (2)). Крім того, тут може бути дієвим використання фокусувальних і фазованих елементів (Тсе, 2005).

Зауважимо, що при реалізації системи дронів як на рисунках 1 чи 2, зовсім не обов'язковим є безпосередній зв'язок кожного дрона з центральним. Не надто складною є задача з об'єднання їх у мережу, де кожен дрон може бути посередником при передачі сигналу по мережі.

Зрозуміло, що для дієздатності системи як такої, вона не повинна розриватись на частини (що можливо, наприклад, при втраті кількох дронів, кожен з яких є посередником при передачі сигналів). Характерна кількість дронів, втрата яких є критичною для системи, може бути оцінена як $2L/a$ (діаметр системи, поділений на відстань між найближчими сусідами).

Ще одним варіантом зв'язку дронів між собою і з центральним дроном є зв'язок в оптичному діапазоні, тобто за посередництвом світлових сигналів. Ефективний радіус взаємодії тут обмежується, фактично, лише умовами прямої видимості (Стущанський, 2024).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Показано, що система невеликих і відносно дешевих дронів може бути ефективною бойовою одиницею, більш захищеною до засобів радіоелектронної боротьби в порівнянні з незалежними дронами порівняної бойової здатності. В подальшому планується виконати моделювання системи засобами математичного моделювання і системного аналізу, дослідити електродинамічні характеристики комунікації в межах «рою» дронів, а також запропонувати механізми змін конфігурації системи дронів у разі втрати частини елементів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шкітов А. А. *Методи захисту радіоканалів БПЛА від несанкціонованого доступу. Збірник наукових праць «Управління розвитком складних систем» Київського національного університету будівництва і архітектури.* № 59, 2024. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.242-247>
2. Іваненко Ю. В., Ляшенко О. С., Філімончук Т. В. *Огляд методів керування безпілотними літальними апаратами. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць.* Т. 1, № 71. 2023. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.026>
3. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design.* 4-th edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
4. Jackson J. D. *Classical Electrodynamics.* 3-rd edition. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1998.
5. Tse D. *Fundamentals of Wireless Communication.* Cambridge University Press, 2005
6. Khawaja W., Guvenc I., Matolak D., Fiebig U.-C., Schneckenberger N. *A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles:* arXiv preprint arXiv: 1801. 01656, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.01656>
7. Chen P., Liu Y. J., Wei W. T., et al. *Air-to-ground channel measurement and modeling for low-altitude UAVs: a survey*, ZTE Communications, vol. 23, no. 2, pp. 60–75, Jun. 2025. <https://doi.org/10.12142/ZTECOM.202502007>
8. Vinogradov E., Sallouha H., De Bast S., Azari M. M., Pollin S. *Tutorial on UAV: A Blue Sky View on Wireless Communication:* arXiv preprint arXiv: arXiv:1901.02306v1, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.02306>
9. Xiao Z., Zhu L., Liu Y., Yi P., Zhang R., Xi Xia X.-G., Schober R. *A Survey on Millimeter-Wave Beamforming Enabled UAV Communications and Networking:* arXiv preprint arXiv: arXiv: 2104.09204, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.09204>
10. Хлапонін Ю., Мироненко В. *Проектування модулів радіозв'язку для БПЛА з використанням нетипових частот. Підводні Технології,* 2(15), 99–104, 2024. <https://doi.org/10.32347/uwt.2024.15.1301>
11. Стущанський Ю. В., Горбатенко З. Д., Матієцько О. І. *Аналіз впливу поверхні Землі на дальність зв'язку каналів телеметрії БПЛА.* Авіація, промисловість, суспільство : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. (м. Кременчук, 16 трав. 2024 р.) / МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуц. льотн. коледж, Наук. парк «Наука та безпека». – Харків : ХНУВС, 2024. С. 90–93.

REFERENCES

1. Shkitov, A. A. (2024). *Metody zakhystu radiokanaliv BPLA vid nesanktsionovanoho dostupu* [Methods for protecting UAV radio channels from unauthorized access]. *Zbirnyk naukovykh prats "Upravlinnia rozvytkom skladnykh system"* Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury, 59. [in Ukrainian].
2. Ivanenko, Yu. V., Liashenko, O. S., & Filimonchuk, T. V. (2023). *Ohliad metodiv keruvannia bezpilotnymi litalnymi aparatamy* [Overview of drone control methods]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats*, 1, 71. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.026> [in Ukrainian].

3. Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4-th edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
4. Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. 3-rd edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
5. Tse, D. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press.
6. Khawaja, W., Guvenc, I., Matolak, D., Fiebig, U.-C., & Schneckenberger, N. A (2018). *Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles*: arXiv preprint arXiv: 1801.01656. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.01656>
7. Chen, P., Liu, Y. J., Wei, W. T., et al. (2025). *Air-to-ground channel measurement and modeling for low-altitude UAVs: a survey*, ZTE Communications, vol. 23, no. 2, pp. 60–75, Jun. <https://doi.org/10.12142/ZTECOM.202502007>
8. Vinogradov, E., Sallouha, H., De Bast, S., Azari M. M., & Pollin, S. (2019). *Tutorial on UAV: A Blue Sky View on Wireless Communication*: arXiv preprint arXiv: arXiv:1901.02306v1, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.02306>
9. Xiao, Z., Zhu, L., Liu, Y., Yi, P., Zhang, R., Xi Xia, X.-G., & Schober, R. (2021). *A Survey on Millimeter-Wave Beamforming Enabled UAV Communications and Networking*: arXiv preprint arXiv: arXiv: arXiv:2104.09204, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.09204>
10. Khlaponin, Yu., & Myronenko, V. (2024). Proektuvannia moduliv radiozviazku dlia BPLA z vykorystanniam netykovykh chastot [Design of radio communication modules for UAVs using non-standard frequencies]. *Pidvodni Tehnologii*, 2(15), 99–104. <https://doi.org/10.32347/uwt.2024.15.1301> [in Ukrainian].
11. Stushchanskyi, Yu. V., Horbatenko, Z. D., & Matisko, O. I. (2024). *Analiz vplyvu poverkhni Zemli na dalnist zviazku kanaliv telemetrii BPLA* [Analysis of the influence of the Earth's surface on the communication range of UAV telemetry channels]. Aviation, industry, society: materials of the V international scientific-practical conference (Kremenichuk, May 16, 2024) / Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenichug Flight College, Science Park "Science and Security". Kharkiv : KhNUVS, 90–93. [in Ukrainian].

Дата надходження статті: 09.09.2025

Дата прийняття статті: 23.09.2025

Опубліковано: 30.12.2025