

Тараса Шевченка), Львова (Львівський національний університет імені Івана Франка, Національний університет «Львівська Політехніка», Інститут біології клітин НАН України) та інші наукові центри.

### **Список літератури**

1. Кривошеїн В. І., Іванченко В. М. Нанотехнології: сучасний стан і перспективи. – Київ : Наукова думка, 2013. – 320 с.
2. Венгер Є. Ф., Гончаренко А. В., Дмитрук Л. М., Оптика малих частинок і дисперсних середовищ. – Київ : Наукова думка, 1999.
3. Somorjai G. A., Li Y. Introduction to Surface Chemistry and Catalysis. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2010. – 784 p.
4. Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. – 2nd ed. – Princeton : Princeton University Press, 2008. – 304 p.
5. Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire M. C. K. Metamaterials and negative refractive index // Science. – 2004. – Vol. 305. – P. 788–792.
6. Rao C. N. R., Müller A., Cheetham A. K. (Eds.). The Chemistry of Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications. – Weinheim : Wiley-VCH, 2004. – Vol. 1. – 856 p.
7. Kuzyk A., Jungmann R., Acuna G. P., Liu N. DNA Origami Route for Nanophotonics // ACS Photonics. – 2018. – Vol. 5. – P. 1151–1163.
8. Castleman A.W., Bowen K.H. Clusters: Structure, Energetics, and Dynamics of Intermediate States of Matter // J. Phys. Chem. – 1996. – Vol. 100. – P. 12911 – 12944.
9. Gulera U., Kildisheva A. V., Itasseva A., Shalae V. M. Plasmonics on the slope of enlightenment: the role of transition metal nitrides. Faraday Discussions. – 2015. – Vol. 178. – P. 71–86.

## **МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДРОНІВ ЗА УМОВИ МАЛОГО РАДІУСУ ОБМІНУ СИГНАЛАМИ**

**Вілігурський Олег Миколайович**

*Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк,  
Україна, 43025*

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

[viligurskyi@gmail.com](mailto:viligurskyi@gmail.com)

Існує багато способів збільшення живучості безпілотних літальних апаратів (Шкітов, 2024). Йдеться про способи протидії засобам радіоелектронної боротьби (РЕБ) і протиповітряної оборони. Для зменшення вразливості перед РЕБ використовують, зокрема, криптографічний захист сигналів, частотну агрегація, використання фізичних бар'єрів, автономні режими польоту (з закриттям усіх радіоканалів зв'язку з оператором), створення унікального програмного забезпечення для БПЛА, оптоволоконні канали зв'язку. У зазначених способах йдеться про забезпечення живучості в однаковій мірі кожного з бойових чи розвідувальних дронів. Але перспективним є також принципово інший підхід, який полягає у використанні відносно великої сукупності дронів, кожен з яких, наприклад, несе невеликий вибуховий заряд. При цьому нема потреби забезпечувати прямий зв'язок кожного з дронів з оператором. Дрони можуть утворювати організовану «хмару» чи «рій», де забезпечений мінімальний обмін сигналами між окремими елементами хмари і, можливо, якимось центральним дроном. Зв'язок з оператором в такому разі потрібний тільки для центрального дрона. Захист центрального дрона від засобів РЕБ ми тут не розглядаємо.

Перевагою такої системи є те, що вона може бути стійкою до втрати доволі великого числа елементів, зберігаючи при цьому свою функціональність. А оскільки відстані між дронами у рої значно менші за відстань до оператора чи цілі, то для обміну сигналами між дронами можна використати технології близького зв'язку, стійкіші до засобів РЕБ.

Геометрія рою може бути різною. Двовимірну систему за рядом чинників є не менш привабливою за тривимірну (Вілігурський, 2025). Найбільш доцільними є способи розміщення дронів: по вузлах квадратної чи по вузлах трикутної ґратки (рис. 1).

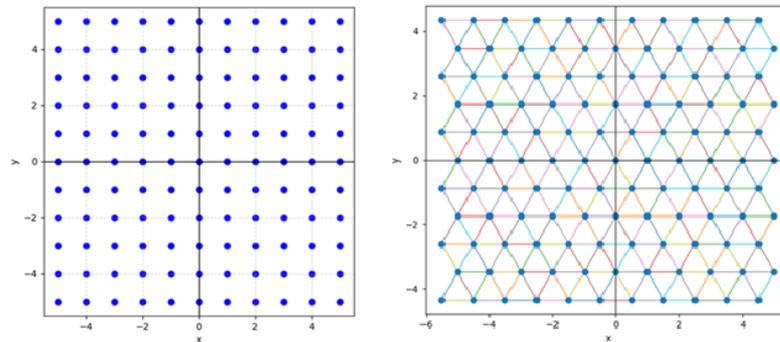


Рис. 1. Варіанти розташування системи дронів по вузлах квадратної та трикутної ґраток

Для стійкості перед засобами РЕБ відстані між окремими дронами повинні бути порядку максимальної дальності передачі слабких керуючих сигналів (це можуть бути сигнали у радіо- чи оптичному діапазоні, або навіть звукові сигнали, якщо їх вдасться виокремити від навколишнього шуму). Такі відстані можуть бути порядку десяти метрів.

Важливо передбачити поведінку системи в разі втрати кількох дронів. Очевидно, якщо дрони будуть прагнути зберегти початкові позиції відносно, скажімо, центра системи, то при початковому числі дронів  $N$  критичною є втрата порядку  $\sqrt{N}$  елементів (наприклад, система розривається на дві частини по діаметру).

Видається доцільним зробити систему більш динамічною. Якщо запрограмувати ефективну взаємодію між дронами, система отримає здатність до самоорганізації. У якості такої ефективної взаємодії можна обрати взаємодію, яка визначається потенціалом Леннард-Джонса:

$$U(r) = \epsilon \left[ \left( \frac{a}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{a}{r} \right)^6 \right].$$

Тут  $a$  – відстань, на якій потенціал має мінімум,  $\epsilon$  – глибина потенціальної ями. В початковий момент дрони доречно розмістити один від одного на відстанях, які близькі до  $a$ .

При такій формі потенціалу система схильна до самоорганізації. Якщо в початковий момент дрони розмістити по вузлах квадратної ґратки (а це технічно простіше), то через деякий проміжок часу розташування дронів буде близьким до вузлів трикутної ґратки. На наступному рисунку показано результат моделювання системи зі 121 елемента, які на старті утворювали квадратну структуру 11 x 11:

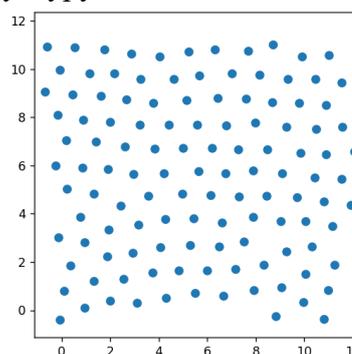


Рис. 2. Конфігурація системи через деякий проміжок часу (великий, в порівнянні кроком елементарної ітерації)

Якщо система втрачає певну кількість дронів, вона все одно зберігає стійкість, яка забезпечується її здатністю до самоорганізації. На наступному рисунку показано стан системи коли вона втратила приблизно 20% елементів (вибраних випадковим чином):

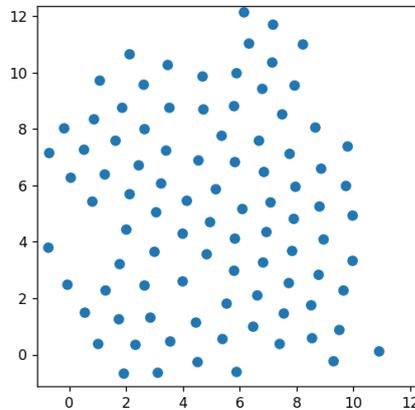


Рис. 3. Конфігурація системи, яка втратила близько 20% елементів

Звичайно, вибір саме потенціалу Леннарда-Джонса не є принциповим. Можна зробити його простішим, забезпечивши лише сталі ефективні притягання для відстаней більших за характеру відстань  $a$  і ефективне відштовхування для відстаней менших за  $a$ .

Як бачимо, комп'ютерне моделювання поведінки системи дронів, які взаємодіють між собою на невеликих відстанях, показує стійкість системи перед втратою доволі великого числа окремих елементів. При цьому малі відстані передачі сигналів можуть бути суттєвою перевагою, коли йдеться про протидію засобам радіоелектронної боротьби.

### Список літератури

1. Шкітов А. А. Методи захисту радіоканалів БПЛА від несанкціонованого доступу. Збірник наукових праць «Управління розвитком складних систем» Київського національного університету будівництва і архітектури. Номер 59, 2024. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.242-247>
2. Вілігурський О. (2025) Деякі способи протидії системи безпілотних літальних апаратів засобам радіоелектронної боротьби. Фізика та освітні технології, (2), 3–7. <https://doi.org/10.32782/pet-2025-2-1>

## ПРОСТИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ПРИКЛАД ВИКОРИСТАННЯ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ДЛЯ ПРИХОВУВАННЯ ТЕКСТОВОГО ПОВІДОМЛЕННЯ В ЗВУКОВОМУ СИГНАЛІ

Головін М.Б., Головіна Н.А., Гузачов Д.М.

ВНУ імені Лесі Українки, [Holovina.Nina@vnu.edu.ua](mailto:Holovina.Nina@vnu.edu.ua)

Сучасні методи стеганографії дозволяють приховувати інформацію у цифрових медіа, таких як зображення, аудіо та відео, без помітної зміни їх властивостей. Одним із ефективних способів приховування текстових повідомлень у звукових сигналах є використання швидкого перетворення Фур'є (FFT, Fast Fourier Transform) [1-3].