

**Платоненко Артем Вадимович**

кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Київ, Україна

ORCID 0000-0002-2962-5667

a.platonenko@kubg.edu.ua

Соколов Володимир Юрійович

кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Київ, Україна

ORCID 0000-0002-9349-7946

v.sokolov@kubg.edu.ua

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ЛЕГКИХ МУЛЬТИРОТОРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ АЕРОРОЗВІДКИ**

Анотація. Розглянуто проблему обґрунтованого вибору легких мультироторних безпілотних літальних апаратів (БпЛА) класу I (категорії «мікро» та «міні») для аеророзвідки, спостереження, коригування вогню, гуманітарного розмінування та ретрансляції сигналу в умовах активної радіоелектронної боротьби (РЕБ). Показано, що поширені в практиці порівняння за паспортними дальністю польоту та вартістю не відображають реальної корисності платформи, оскільки результат спостереження визначається одночасно дальністю керування, висотою польоту, роздільною здатністю й кратністю збільшення оптичного та інфрачервоного (ІЧ) каналів, типом об'єкта та стійкістю навігаційної системи до завад. Запропоновано геометричну модель ефективної дистанції спостереження, що поєднує обмеження каналу керування (радіогоризонт, перша зона Френеля, відношення завади/сигнал), енергетичний радіус і оптичну дальність, нормовану за критеріями Джонсона для трьох типів об'єктів (людина, автомобіль, будівля). Введено поняття ефективної фокусної відстані з урахуванням обмеження роздільної здатності відеопотоку, що пояснює межу корисності гібридного цифрового збільшення. На цій основі сформовано багатокритеріальну матрицю з десяти критеріїв і виконано оцінювання п'яти платформ DJI (Mini 4 Pro, Mavic 3, Mavic 3T, Matrice 30T, Matrice 4T). Розрахункова дальність розпізнавання людини в денному каналі становить від 252 м до 4,2 км, дальність виявлення автомобіля в ІЧ-каналі — від 818 м до 1084 м. Натурними випробуваннями під дією «жорсткої» підміни координат GNSS (хибне положення в м. Ліма, Перу) встановлено, що Matrice 4T виявляє підробний сигнал, утримує позицію за візуальними датчиками вдень і залишається керованим у режимі АТТІ вночі, тоді як DJI Mavic 3 попереднього покоління було втрачено попри програмне відключення навігації. Інтегральна оцінка за базових вагових коефіцієнтів становить 0,708 для Matrice 4T і 0,631 для Matrice 30T; аналіз чутливості показав, що перевага змінюється вже за ваги критерію стійкості до РЕБ понад 0,05. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування вибору БпЛА підрозділами та рятувальними службами й формування вимог до перспективних платформ.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, аеророзвідка, радіоелектронна боротьба, підміна координат, GNSS-спуфінг, критерії Джонсона, тепловізійна камера, багатокритеріальна оцінка, ефективна дистанція спостереження, кібербезпека.

ВСТУП

Легкі мультироторні БпЛА цивільного походження стали масовим засобом тактичної аеророзвідки. Завдяки серійному виробництву, компактності, можливості зльоту з руки та зависання над точкою вони забезпечують спостереження, коригування вогню, фіксацію результатів ураження, скидання вантажів і пошук поранених на рівні підрозділу [1, 2]. Ті самі платформи використовуються рятувальниками й операторами гуманітарного розмінування для пошуку людей і виявлення вибухонебезпечних предметів на



поверхні, а в цивільному секторі — для картографування, інспекцій, охорони територій і агроаналітики [3, 4].

Водночас ці апарати проєктувалися для середовища без цілеспрямованих завад. Канали керування й передавання відео працюють у ліцензійно-вільних діапазонах 2,4/5,8 ГГц, а навігація покладається на відкриті сигнали GNSS, потужність яких біля поверхні Землі менша за рівень теплового шуму [5, 6]. Тому придушення каналу керування, придушення навігації та підміна координат (GNSS-спуфінг) стали основними причинами втрат таких БпЛА [7–9]. Особливо небезпечним є «жорсткий» спуфінг із високою потужністю сигналу, за якого апарат «переноситься» на тисячі кілометрів, втрачає стабільність і падає навіть далеко від лінії зіткнення.

Отже, вибір платформи для аеророзвідки не може зводитися до порівняння паспортної дальності польоту й вартості. Потрібна модель, що пов'язує технічні характеристики БпЛА з ефективною дистанцією спостереження конкретного типу об'єкта та з поведінкою апарата під дією засобів РЕБ.

Постановка проблеми. Метою статті є розроблення методики багатокритеріальної оцінки легких мультироторних БпЛА для аеророзвідки, яка враховує ефективну висоту та ефективну дистанцію спостереження, нормовані за типом об'єкта, а також стійкість до засобів РЕБ, підтверджену натурними випробуваннями. Для досягнення мети розв'язано такі завдання: визначено класифікаційні межі об'єкта дослідження; побудовано геометричну модель ефективної дистанції спостереження; формалізовано оптичну дальність через критерії Джонсона та ефективну фокусну відстань; сформовано багатокритеріальну матрицю; експериментально досліджено поведінку платформ під дією придушення й підміни координат.

Досліджувана сфера охоплює БпЛА класу I категорій «мікро» та «міні» — насамперед цивільні й промислові квадрокоптери DJI серій Mini, Mavic і Matrice та їхні аналоги Autel серій EVO II і EVO Max [10–13]. БпЛА літакового типу розглянуто лише як альтернативу для порівняння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класифікації БпЛА за злітною масою, конфігурацією, рівнем застосування та типом силової установки систематизовано в оглядах [1, 2]; для національної практики запропоновано удосконалення класифікації з урахуванням досвіду бойового застосування [14] та уніфіковано поняття БпЛА для судових експертиз [15]. Нормативною основою для державної авіації України є Правила, затверджені наказом Міністерства оборони України № 661 [16]. Однак класифікаційні ознаки не відповідають на питання, яка з платформ одного класу ефективніша для конкретного завдання.

Задачу вибору БпЛА як задачу багатокритеріального прийняття рішень розглянуто в роботі [17], де ваги критеріїв визначено методом аналізу ієрархій [18], а ранжування альтернатив — методом TOPSIS [19]. Такі моделі оперують паспортними характеристиками (дальність, тривалість польоту, корисне навантаження, вартість), але не враховують здатність камери розрізнити об'єкт на заданій відстані та стійкість до РЕБ.

Дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації для оптико-електронних систем традиційно оцінюють за критеріями Джонсона [20], еволюцію та обмеження яких проаналізовано в [21]; методику лабораторного визначення дальностей для тепловізорів наведено в [22], фізичні основи ІЧ-зйомки — у [23, 24]. Ефективність тепловізійних БпЛА для виявлення вибухонебезпечних предметів показано в [4, 25] із застосуванням глибинного навчання.

Модель каналу «повітря–земля», вплив висоти на зону покриття та ймовірність прямої видимості досліджено в [26–29]. Загрози підміни координат описано в класичній роботі [30], де продемонстровано перехоплення керування БпЛА через GPS-спуфінг, та в оглядах [6, 31–33]. Методи виявлення спуфінгу на основі машинного навчання [34] та узгодження GNSS із візуально-інерціальною одометрією [35] підтверджують, що ключовим чинником стійкості є незалежне від GNSS джерело навігаційної інформації. Проте у відкритих джерелах бракує натурних даних про поведінку серійних цивільних платформ під дією потужного спуфінгу, а також методик, що інтегрують ці дані у вибір платформи.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження та класифікаційні межі

Відповідно до класифікації за злітною масою та рівнем застосування [14, 16] досліджувані БпЛА належать до класу I («легкі»): категорії «мікро» (тактичні) зі злітною масою до 2 кг та «міні» (тактичні поля бою) — від 2 до 15 кг (табл. 1). До першої категорії належать серії DJI Mini 4Pro, Mavic 3, Matrice 4 та Autel EVO II, до другої — DJI Matrice 30 та важчі промислові платформи.

Класифікаційні межі легких БпЛА та типові платформи, що розглядаються

Клас / категорія	Злітна маса	Рівень застосування	Типові представники
I, «мікро»	до 2 кг	тактичний (підрозділ)	DJI Mini 4 Pro, Mavic 3, Mavic 3E/3T, Matrice 4T; Autel EVO II, EVO Max 4T
I, «міні»	2–15 кг	тактичний (поле бою)	DJI Matrice 30T, Matrice 300/350/400 RTK
I, «малі» та вище	понад 15 кг	тактичний і вище	БпЛА літакового типу, гібридні та конвертоплани (для порівняння)

Основні завдання таких мультироторів: спостереження й аеророзвідка, коригування вогню, фіксація ураження цілей ударними БпЛА, скидання вантажів, пошук і супроводження поранених, а також ретрансляція сигналу керування та відео для FPV-дронів, що збільшує радіус їхньої ефективної дії.

Геометрична модель ефективної дистанції спостереження

Критичним параметром для аеророзвідки є не максимальна дальність польоту, а відстань від оператора до об'єкта, на якій об'єкт буде виявлено або розпізнано без втрати апарата. Запропоновано геометричну модель (рис. 1): оператор перебуває в точці старту, БпЛА — на висоті h і горизонтальній відстані x , об'єкт — на поверхні. Політ обмежено дальністю керування $l_{\text{кер}}$, енергетичним радіусом l_E та максимальною висотою h_{max} , а спостереження — оптичною дальністю $R_{\text{опт}}$, яка залежить від камери, типу об'єкта й умов.

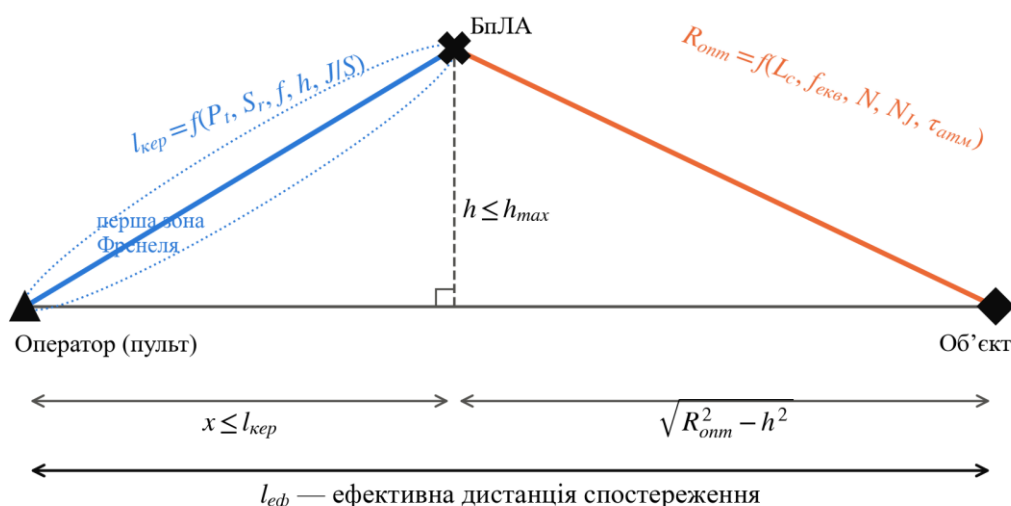


Рис. 1. Геометрична модель ефективної дистанції спостереження легким БпЛА

Ефективна дистанція спостереження визначається як

$$l_{\text{еф}} = x^* + \sqrt{R_{\text{опт}}^2 - h^2}, \quad x^* = \min\{l_{\text{кер}}, l_E\}, \quad h \leq h_{\text{max}}, \quad (1)$$

де енергетичний радіус з урахуванням повернення та резерву заряду

$$l_E = \frac{k_p v t_n}{2}, \quad (2)$$

де v — крейсерська швидкість; t_n — тривалість польоту; $k_p \approx 0,6-0,7$ — коефіцієнт, що враховує резерв заряду, час зависання над об'єктом і вітер. Максимальна висота h_{max} залежить від погоди, налаштувань, типу конструкції, маси та ємності батареї; для більшості мультироторів робоча висота не перевищує 500 м, тоді як БпЛА літакового типу працюють на висотах 2–3 км [1].

Обмеження каналу керування

Дальність керування $l_{\text{кер}}$ є функцією потужності передавача P_t , чутливості приймача S_r , частоти f , висоти польоту, погоди (найгірших умов) та завад. Необхідною умовою є пряма видимість, обмежена радіогоризонтом з урахуванням рефракції (еквівалентний радіус Землі $4/3$) [36]:



$$d_{\text{пр}} = 4,12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ [км]}, \quad (3)$$

де h_1, h_2 — висоти антен пульту і БпЛА, м. Для $h_1 = 1,5$ м і $h_2 = 120$ м радіогоризонт становить 50 км, тобто значно перевищує паспортну дальність 8–12 км. Отже, практичну дальність обмежують не кривизна Землі, а рельєф, рослинність, забудова та РЕБ. Для стійкого зв'язку має бути вільною щонайменше 60 % першої зони Френеля [29, 36], радіус якої

$$r_1 = 17,32 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}}, \quad (4)$$

де d_1, d_2 — відстані від точки траси до кінців, км; $d = d_1 + d_2$; f — частота, ГГц; r_1 — м. Для $d = 8$ км і $f = 2,4$ ГГц у середині траси $r_1 \approx 15,8$ м, тож над лісом висотою 20–25 м апарату потрібна висота над пультотом щонайменше 30–35 м. Саме тому на граничних дальностях оператор змушений набирати висоту.

В умовах придушення визначальним стає відношення завада/сигнал на вході приймача БпЛА. Для вільного простору [37]

$$\frac{J}{S} = \frac{P_J G_J d_S^2}{P_S G_S d_J^2}, \quad (5)$$

звідки гранична дальність керування за відомої відстані до станції РЕБ d_J

$$l_{\text{кер}}^{\text{РЕБ}} = d_J \sqrt{\frac{P_S G_S}{P_J G_J (J/S)_{\text{пор}}}}, \quad (6)$$

де P_S, G_S та P_J, G_J — потужності й коефіцієнти підсилення антен пульту і станції завад; $(J/S)_{\text{пор}}$ — порогове відношення, за якого втрачається зв'язок. Збільшення висоти покращує пряму видимість не лише з пультотом, а й зі станцією РЕБ, тому в зоні активного придушення залежність ефективної дальності керування від висоти змінює знак: $l_{\text{кер}} \sim 1/h_{\text{макс}}$. Цей ефект добре узгоджується з практикою польотів на малих висотах уздовж лінії зіткнення.

Оптична дальність і нормування за типом об'єкта

Оптична дальність $R_{\text{опт}}$ залежить від погоди, типу матриці (видимий або ІЧ-діапазон), кута до поверхні, часу доби та виду збільшення (оптичне чи цифрове). Для нормування використано критерії Джонсона [20, 21]: імовірність 50 % виявлення, розпізнавання та ідентифікації досягається, коли на критичний розмір об'єкта L_c припадає відповідно $N_J = 1$; 4 та 6,4 періоди (пари ліній), тобто 2; 8 та 12,8 пікселя (табл. 2).

Таблиця 2

Нормування за типом об'єкта: критичні розміри та критерії Джонсона

Тип об'єкта	Критичний розмір L_c , м	Виявлення, $N_J = 1$	Розпізнавання, $N_J = 4$	Ідентифікація, $N_J = 6,4$
Людина	0,75	2 пікселі	8 пікселів	12,8 пікселя
Автомобіль	2,3	2 пікселі	8 пікселів	12,8 пікселя
Будівля	8,0	2 пікселі	8 пікселів	12,8 пікселя

Кутова роздільна здатність (миттєве поле зору одного пікселя) камери з еквівалентною (для кадру 36 мм) фокусною відстанню $f_{\text{екв}}$ і N пікселями по горизонталі

$$\theta = \frac{36}{f_{\text{екв}} N}, \quad (7)$$

Для аеророзвідки в реальному часі оператор і дешифрувальник бачать не повнорозмірний кадр сенсора, а відеопотік шириною N_v (зазвичай 1920 пікселів). Цифрове збільшення до кратності N_s/N_v , де N_s — ефективна ширина сенсора, зводиться до вирівнання фрагмента без втрати деталізації; далі воно лише інтерполює зображення. Тому введено ефективну фокусну відстань

$$f_{\text{еф}} = f_{\text{екв}} \cdot \min \left\{ Z_{\text{ц}}, \frac{N_s}{N_v} \right\}, \quad (8)$$

де $Z_{\text{ц}}$ — доступна кратність цифрового збільшення. Прирівнюючи кількість пікселів на об'єкті $L_c/(R\theta)$ до $2N_J$, отримуємо оптичну дальність

$$R_{\text{опт}} = \frac{L_c f_{\text{еф}} N_v}{72 N_J}. \quad (9)$$

Вираз (9) задає теоретичну верхню межу, яку зменшують атмосферне пропускання, серпанок, турбулентність, вібрації підвісу та стиснення відео. Для ІЧ-каналу ($N = 640$) цифрове збільшення не додає



деталізації, тому $f_{\text{эф}} = f_{\text{скв}}$. Важливо також, що кут до поверхні впливає на контраст: при надирній зйомці ІЧ-камера краще виявляє тепловий слід малих об'єктів (мін, людей), тоді як похила зйомка збільшує дальність, але погіршує контраст через відбиття та довший атмосферний шлях [23].

Багатокритеріальна матриця

На основі моделі (1)–(9) і досвіду експлуатації сформовано десять критеріїв (табл. 3). Вагові коефіцієнти визначено експертно бальним методом з подальшим нормуванням ($\sum w_j = 1$); найбільші ваги надано ефективній дистанції спостереження та стійкості до РЕБ як критеріям, що безпосередньо визначають результат розвідки та збереження апарата.

Таблиця 3

Критерії багатокритеріальної матриці та їхні вагові коефіцієнти

Позначення	Критерій	Одиниця / шкала	Тип	Вага w_j
K1	Дальність розпізнавання людини в денному каналі (9)	м	max	0,18
K2	Дальність керування (СЕ, без завад)	км	max	0,10
K3	Тривалість польоту	хв	max	0,12
K4	Маса апарата	г	min	0,06
K5	Вартість	умовний індекс (Mini 4 Pro = 1)	min	0,10
K6	Нічна робота: дальність виявлення автомобіля в ІЧ-каналі	м	max	0,12
K7	Стійкість до придушення та підміни координат	бали 0–3	max	0,16
K8	Стійкість до умов середовища (вітер, температура, IP)	бали 0–3	max	0,06
K9	Час підготовки та заряджання	бали 0–3	max	0,04
K10	Лазерний далекомір (дальність)	м	max	0,06

Для критерію K7 прийнято шкалу: 0 — відсутні засоби протидії; 1 — можливе лише програмне відключення GNSS; 2 — заявлена виробником візуальна навігація без GNSS, не перевірена натурно; 3 — підтверджене випробуваннями виявлення спуфінгу й утримання позиції. Нормування виконано за правилами

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \text{ (критерій max); } r_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \text{ (критерій min),} \quad (10)$$

а інтегральну оцінку альтернативи обчислено як зважену суму [17, 19]

$$S_i = \sum_{j=1}^{10} w_j r_{ij}, \quad \sum_{j=1}^{10} w_j = 1. \quad (11)$$

Методика натурних випробувань

Натурні дані отримано під час практичної експлуатації БпЛА DJI Mavic 2 Pro, Mavic 2 Enterprise Advanced, Mavic 3, Mavic 3E, Mavic 3T, Matrice 30T та Matrice 4T у 2023–2026 рр. для задач спостереження, обстеження територій і пошуку вибухонебезпечних предметів (на макетах і знешкоджених зразках). Аналізувалися знімки екрана пульта, журнали польотів, сповіщення програмного забезпечення DJI Pilot 2 / DJI Fly та стан апаратів після польотів. Поведінку Matrice 4T під дією підміни координат досліджено за чотирма сценаріями (табл. 5), кожен з яких повторено вдень і в темний час доби для перевірки стабільності польоту.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Функціональні можливості легких мультироторних БпЛА

Найпоширенішою платформою для військових задач залишається DJI Mavic 3 (рис. 2), а для задач, що потребують тепловізійного каналу, — промислові Mavic 3T та Matrice 30T (рис. 3).

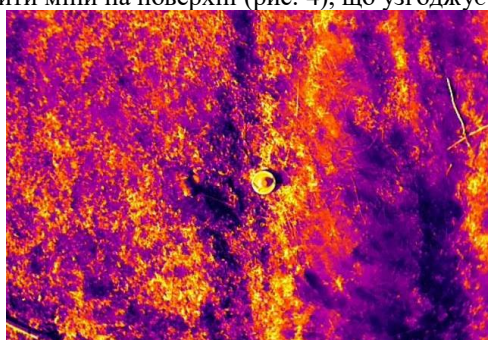


Рис. 2. DJI Mavic 3 — найпоширеніший цивільний БпЛА серед військових

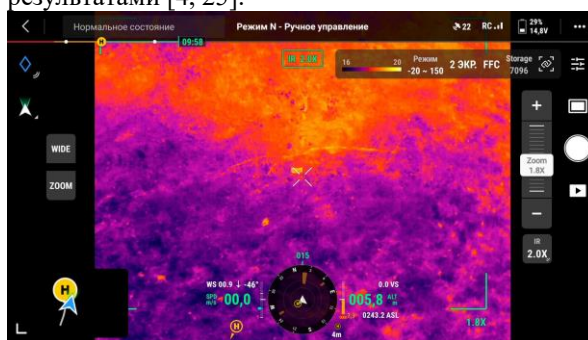


Рис. 3. DJI Mavic 3T та DJI Matrice 30T після польоту

Для рятувальників і гуманітарних місій такі апарати використовуються для пошуку людей і розмінування деокупованих територій: завдяки камерам видимого та ІЧ-діапазонів з висоти можна виявити міни на поверхні (рис. 4), що узгоджується з результатами [4, 25].



а



б

Рис. 4. Виявлення мін з борту DJI Mavic 3T: а — протитанкова міна ТМ-62П у тепловізійному каналі; б — протипіхотна міна МОН-50 на екрані пульту

На рис. 5 наведено знімки з висоти 120 м, отримані DJI Mavic 2 Enterprise Advanced. У тепловізійному каналі видно людей на майданчику, собаку, автомобілі (з розрізненням тих, що приїхали нещодавно, і тих, що стоять давно), тепловтрати будівлі й тепломережі, тоді як у видимому каналі людей на майданчику в темряві не видно, а гравців на полі розпізнати важко. Великою перевагою сучасних платформ є поєднання зображень обох каналів у режимі двох екранів (рис. 6).



а



б

Рис. 5. Знімки з висоти 120 м з візуальної (а) та тепловізійної (б) камер DJI Mavic 2 Enterprise Advanced



Рис. 6. Протитанкова міна ТМ-62П на пульті DJI Matrice 30T: тепловізійна та візуальна камери в режимі двох екранів

Характеристики платформ і залежність «вартість–функціональність»

Серія DJI Mavic 3 включає шість моделей — три цивільні та три промислові [10, 38]:

– DJI Mavic 3 — ширококутна камера 20 Мп і 12 Мп зум-камера з 7× оптичним та 28× гібридним збільшенням;

– DJI Mavic 3 Classic — лише ширококутна камера 20 Мп;

– DJI Mavic 3 Pro — ширококутна камера 20 Мп, 3× зум-камера 48 Мп і 12 Мп зум-камера з 7× оптичним та 28× гібридним збільшенням;

– DJI Mavic 3E — камери як у Mavic 3, але з гібридним збільшенням до 56×;

– DJI Mavic 3T — ширококутна камера 48 Мп, зум-камера до 56× та тепловізійна камера 640×512 з 28× цифровим збільшенням;

– DJI Mavic 3M — ширококутна камера 20 Мп та чотири мультиспектральні камери.

Залежність функціональності від вартості чітко простежується в лінійці DJI: найдешевша й найменша серія Mini забезпечує цифрове збільшення до 4×, Mavic 3 Enterprise — гібридне до 56×, а більший Matrice 30T — до 200×, вологозахищеність апарата й пульта (IP55) та можливість підключення другого пульта для керування підвісом і камерою. Окрім тривалості й дальності польоту, важать маса й час заряджання: серія Mini (до 249 г) заряджається від павербанка, Mavic 3 потребує зарядного пристрою 65 Вт, а хаб на 100 Вт для промислових моделей скорочує час підготовки до повторного вильоту. Порівняльні характеристики наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Характеристики досліджуваних платформ за даними виробника

Параметр	Mini 4 Pro	Mavic 3	Mavic 3T	Matrice 30T	Matrice 4T
Маса, г	249	895	920	3770	1219
Тривалість польоту, хв	34	46	45	41	49



Параметр	Mini 4 Pro	Mavic 3	Mavic 3T	Matrice 30T	Matrice 4T
Дальність передавання (CE), км	10	8	8	8	12
Стійкість до вітру, м/с	10,7	12	12	12	12
Робоча температура, °C	–10...40	–10...40	–10...40	–20...50	–10...40
Денна зум-камера (f _{суб}), мм	24 (цифр. 4×)	162 (гібр. 28×)	162 (гібр. 56×)	113–405 (гібр. 200×)	70 і 168 (гібр. 112×)
ІЧ-камера	—	—	640×512, 40 мм	640×512, 40 мм	640×512 (1280×1024 SR), 53 мм
Лазерний далекомір, м	—	—	—	1200	1800
Захист IP	—	—	—	IP55	—

Дані табл. 4 наведено за специфікаціями [10, 38–41]; паспортна дальність передавання відповідає умовам без перешкод і завад та в міській забудові зменшується до 1,5–3 км.

Розрахунок дальностей спостереження

Результати розрахунку за виразами (6)–(9) для ширини відеопотоку $N_v = 1920$ та ефективної ширини сенсора $N_s = 4000$ (12 Мп або 48 Мп Quad Bayer) наведено на рис. 7. Ефективна фокусна відстань становить 50 мм для Mini 4 Pro, 338 мм для Mavic 3 і Mavic 3T, 350 мм для Matrice 4T та 844 мм для Matrice 30T; подальше цифрове збільшення не підвищує деталізації відеопотоку.

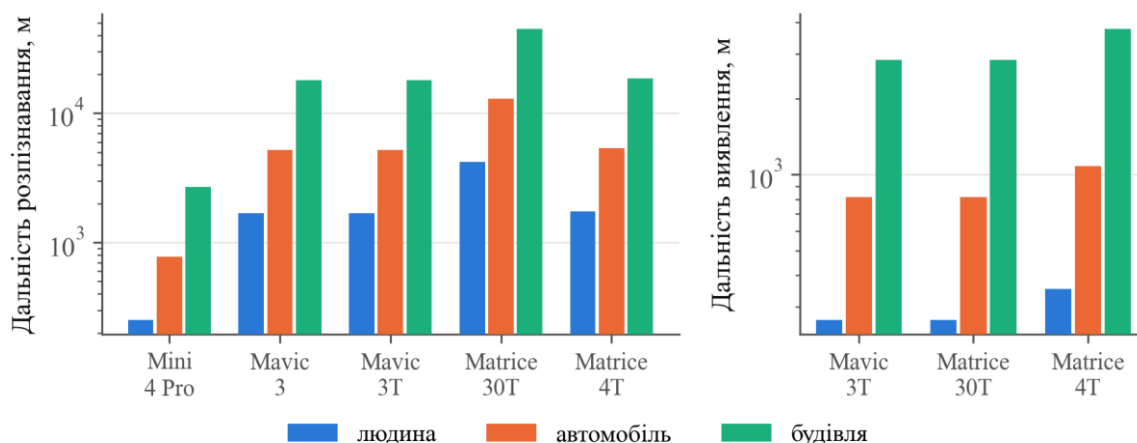


Рис. 7. Розрахункові дальності: а — розпізнавання об'єктів у денному каналі ($N_J = 4$); б — виявлення об'єктів у тепловізійному каналі ($N_J = 1$)

Дальність розпізнавання людини в денному каналі зростає від 252 м (Mini 4 Pro) до 1 688 м (Mavic 3/3T), 1 750 м (Matrice 4T) та 4 219 м (Matrice 30T). Для автомобіля ці значення в 3,1 раза, а для будівлі — у 10,7 раза більші, що й обґрунтовує нормування за типом об'єкта: одна й та сама платформа може бути придатною для контролю дороги, але недостатньою для розпізнавання піхоти. У тепловізійному каналі дальності на порядок менші: виявлення людини — 267 м для Mavic 3T і Matrice 30T та 353 м для Matrice 4T, виявлення автомобіля — 818 м та 1 084 м відповідно. Режим суперроздільної здатності 1280×1024 Matrice 4T теоретично подвоює ці значення. Результат узгоджується з наведеним вище спостереженням: з висоти 120 м людина в ІЧ-каналі займає близько 5 пікселів, тобто виявляється, але не розпізнається.

Отже, з урахуванням виразу (1) для Mavic 3T на висоті 300 м при $x^* = 5$ км ефективна дистанція розпізнавання людини вдень становить близько 6,7 км. Вночі дальність виявлення автомобіля в ІЧ-каналі зменшує її до 5,8 км, а людину з висоти 300 м не буде виявлено взагалі ($R_{\text{опт}} < h$): потрібне зниження до

150 м, за якого дистанція становить лише 5,2 км. Отже, нічна робота вимагає наближення апарата до об'єкта та зниження, а значить — глибшого входження в зону дії РЕБ.

Вплив засобів РЕБ на канали навігації та керування

Середня тривалість польоту легких мультироторів становить до 30–45 хв, паспортна дальність — до 8–12 км, але фактичні значення залежать від місцевості та застосування засобів РЕБ. На рис. 8 відображено придушення системи навігації (GNSS) на DJI Mavic 3: апарат переходить у режим утримання висоти (АТТІ) без утримання позиції, і оператор мусить компенсувати знесення вітром вручну. На рис. 9 показано придушення каналу керування, на рис. 10 — одночасну втрату відеозв'язку з пультом і навігації.



Рис. 8. Придушення системи навігації на DJI Mavic 3

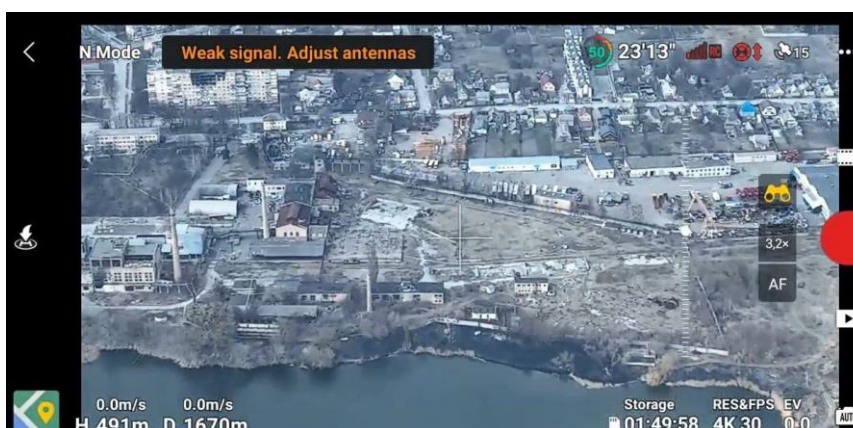


Рис. 9. Придушення системи керування на DJI Mavic 3

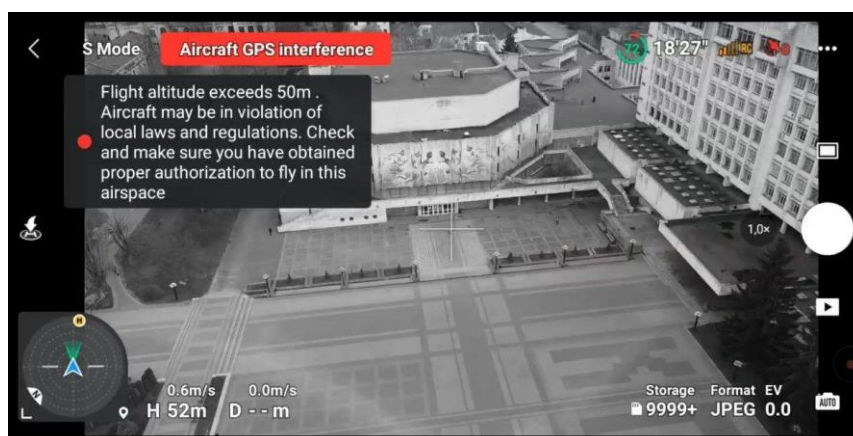


Рис. 10. Придушення систем навігації та керування на DJI Mavic 3

Значно небезпечнішою є підміна координат. Номінальна потужність сигналу GPS L1 C/A біля поверхні Землі становить близько $-128,5$ дБм [5]. Передавач спуфінгу потужністю лише 10 мВт на відстані 10 км у вільному просторі створює на частоті 1575 МГц сигнал близько -106 дБм, тобто на 22 дБ потужніший за справжній, а з піднятою антеною перевищення зберігається на десятках кілометрів [6, 31]. Цим пояснюється, що з кінця весни — початку літа 2025 р. під час повітряних тривог фіксувалися численні втрати коптерів навіть за тривог у сусідніх областях.

На рис. 11 показано підміну координат для DJI Mavic 2 Pro: апарат перебував у радіусі 200 м від оператора, але «вирішив», що відстань від точки зльоту становить 47,8 км. Подібну можливість впливу на керування продемонстровано в [30].

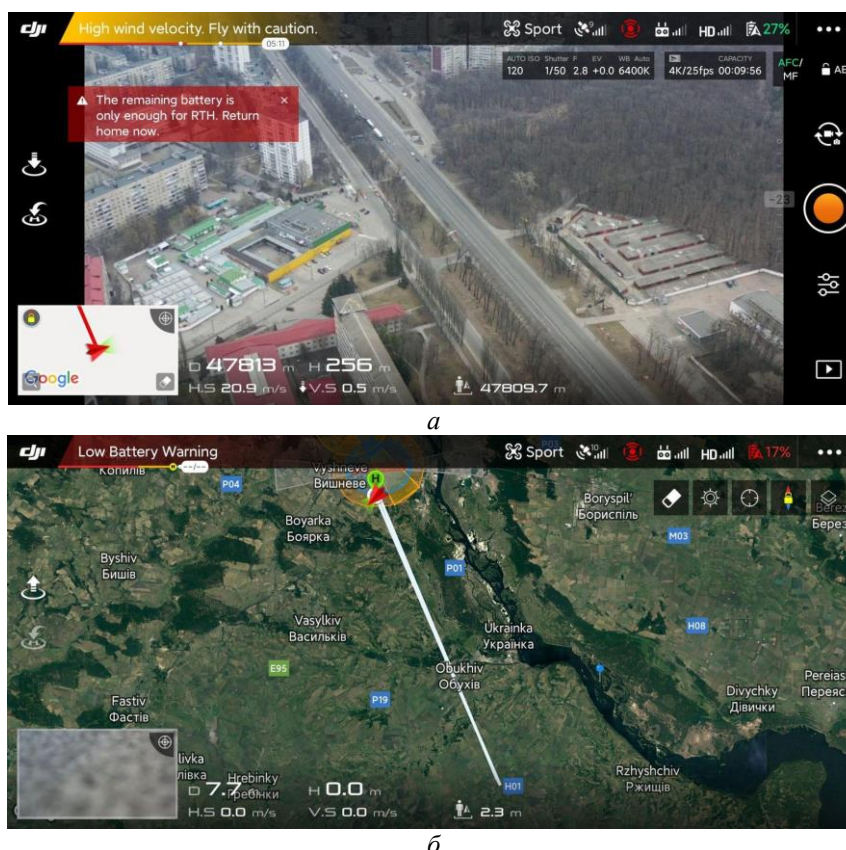


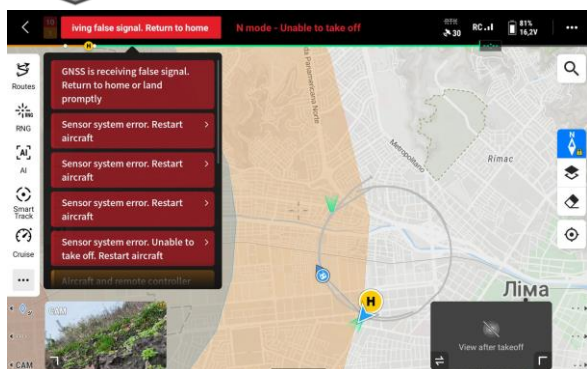
Рис. 11. Підміна координат для DJI Mavic 2 Pro: а — хибна дистанція від точки зльоту 47 813 м; б — хибне положення на карті

Поведінка платформ в умовах «жорсткого» спуфінгу

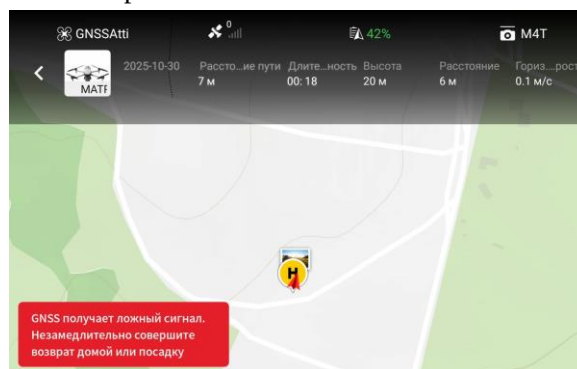
Під час спілкування з військовими фахівцями та інженерами рекомендованого сервісного центру DJI встановлено, що масові втрати пов'язані з «жорстким» спуфінгом — підміною координат, динамічної висоти над рівнем моря та часу з високою потужністю сигналу, найчастіше на положення в м. Ліма (Перу). Оператори досі майже щотижня звертаються з питанням, як уберегти коптери, проте для попередніх поколінь ефективним залишається лише апаратне відключення приймача GNSS (яке все одно не завжди може допомогти).

Порівняльні спостереження показали принципову різницю поколінь. Під час тривоги в Чернігівській області та польотів поблизу Києва DJI Mavic 3E (без модифікованої прошивки) приймав підробний сигнал: апарат розпізнавав 24 супутники з поганим рівнем сигналу (відображалися червоним) і позиціонував себе в м. Ліма. У той самий час Matrice 4T видав сповіщення про підробний сигнал навігації, відображав 0 супутників, не здійснював жодних ривків і завдяки візуальним датчикам визначав своє справжнє положення та переміщення (рис. 12). Навіть у приміщенні Matrice 4T, прийнявши підробний сигнал і «полетівши» по підробному колу в Перу, припиняв це переміщення після переходу в режим ATTI.

Результати тестових польотів Matrice 4T за чотирма сценаріями узагальнено в табл. 5.



а



б

Рис. 12. Динамічна підміна координат для DJI Matrice 4T: а — апарат на землі (положення в м. Ліма, заборона зльоту); б — апарат у польоті (0 супутників, режим GNSS-ATTI, справжні координати)

Таблиця 5

Поведінка DJI Matrice 4T під дією підміни координат GNSS

Сценарій	Світлий час доби	Темний час доби
1. Зліт без спуфінгу з подальшим його ввімкненням	Сповіщення про підробний сигнал; утримання позиції за візуальними датчиками; стабільний політ	Перехід у режим АТТІ через недостатнє освітлення; апарат стабільний і керований
2. Увімкнення апарата під дією спуфінгу	Часткові обмеження зльоту («Unable to take off»), вимога перезавантаження	Ті самі обмеження зльоту; після зльоту — режим АТТІ, політ стабільний і керований
3. Перезавантаження під дією спуфінгу	Запуск моторів можливий після кількох переходів у режим АТТІ	Режим АТТІ, політ стабільний і керований
4. Зліт після вимкнення спуфінгу та ввімкнення спуфінгу в польоті	Стабільний політ, позиція в межах справжнього положення, без ривків	Режим АТТІ, стабільний і контрольований політ

Старіший DJI Mavic 3 у зоні дії такого засобу протидії було пошкоджено, попри програмне відключення навігації (рис. 13). Аналіз журналу польоту (рис. 14) показує, що протягом приблизно двох секунд кількість супутників зменшилася з 17 до 0, розрахункова відстань до точки зльоту стрибкоподібно зросла зі 110 до 329 м, система зафіксувала нереалістичну швидкість 47 м/с, бічний удар і блокування моторів. Останні зареєстровані координати апарата відповідали центру м. Ліма (рис. 15). Отже, хибна навігаційна інформація потрапила в контур стабілізації, і регулятор, намагаючись компенсувати «зміщення», спричинив зіткнення.



Рис. 13. Пошкоджений DJI Mavic 3 в зоні дії «жорсткої» підміни координат

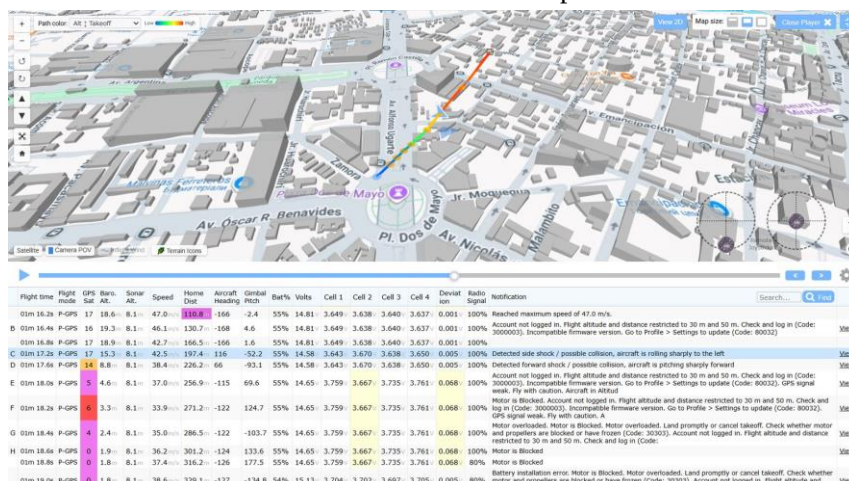


Рис. 14. Журнал польоту DJI Mavic 3 у момент впливу перед падінням

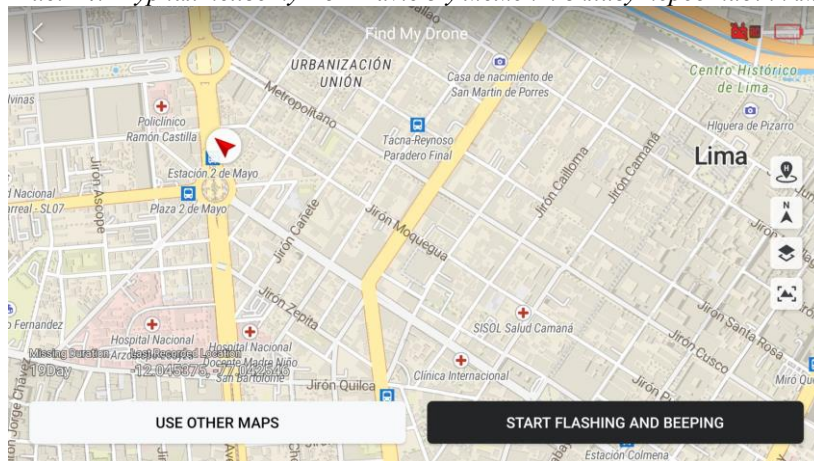


Рис. 15. Останні координати DJI Mavic 3 у м. Ліма

Отримані результати підтверджують висновки [33, 35]: стійкість до спуфінгу забезпечується не відключенням GNSS, а наявністю незалежного джерела навігації (візуальної одометрії) та логіки перевірки узгодженості, яка вилучає GNSS з контуру керування до того, як хибні дані спричинять маневр.

Розпізнавання об'єктів з використанням штучного інтелекту

Промислові платформи останнього покоління підтримують завантаження власних моделей штучного інтелекту (ШІ) для розпізнавання об'єктів на борту. На рис. 16 показано автоматичне виявлення макетів мін з використанням моделі, навченої на платформі DJI, з висоти близько 24 м при 7× збільшенні. Такий режим знижує навантаження на оператора та узгоджується з результатами застосування глибинного навчання для виявлення вибухонебезпечних предметів [4, 25].

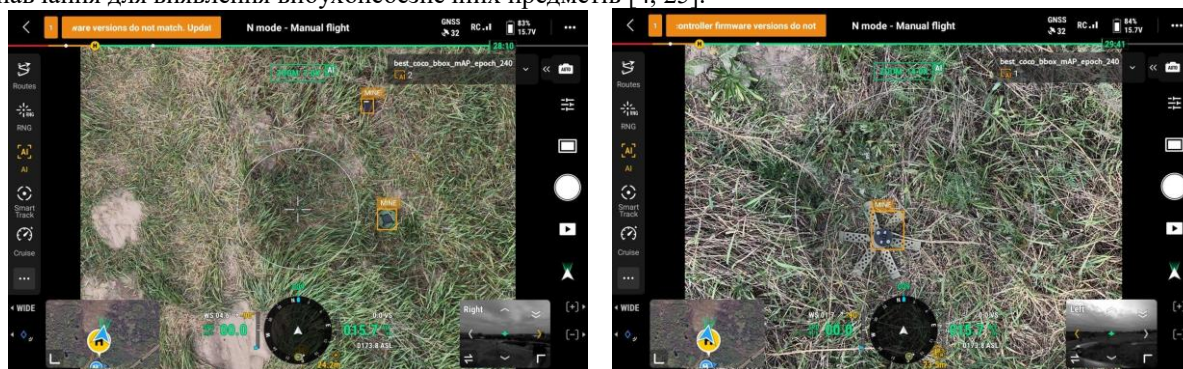


Рис. 16. Приклади розпізнавання макетів мін з використанням ШІ на основі навчання моделі DJI



Результати багатокритеріальної оцінки

Вихідні значення критеріїв і нормовані оцінки наведено в табл. 6, інтегральні оцінки та аналіз чутливості — на рис. 17.

Таблиця 6

Матриця рішень: вихідне значення / нормована оцінка g_{ij}

Критерій	Mini 4 Pro	Mavic 3	Mavic 3T	Matrice 30T	Matrice 4T
K1, м	252 / 0,06	1688 / 0,40	1688 / 0,40	4219 / 1,00	1750 / 0,41
K2, км	10 / 0,83	8 / 0,67	8 / 0,67	8 / 0,67	12 / 1,00
K3, хв	34 / 0,69	46 / 0,94	45 / 0,92	41 / 0,84	49 / 1,00
K4, г	249 / 1,00	895 / 0,28	920 / 0,27	3770 / 0,07	1219 / 0,20
K5, індекс	1 / 1,00	2,5 / 0,40	6 / 0,17	11 / 0,09	7 / 0,14
K6, м	0 / 0,00	0 / 0,00	818 / 0,75	818 / 0,75	1084 / 1,00
K7, бали	0 / 0,00	1 / 0,33	1 / 0,33	1 / 0,33	3 / 1,00
K8, бали	1 / 0,33	1 / 0,33	1 / 0,33	3 / 1,00	1 / 0,33
K9, бали	3 / 1,00	2 / 0,67	2 / 0,67	2 / 0,67	2 / 0,67
K10, м	0 / 0,00	0 / 0,00	0 / 0,00	1200 / 0,67	1800 / 1,00
S_i	0,397	0,408	0,472	0,631	0,708

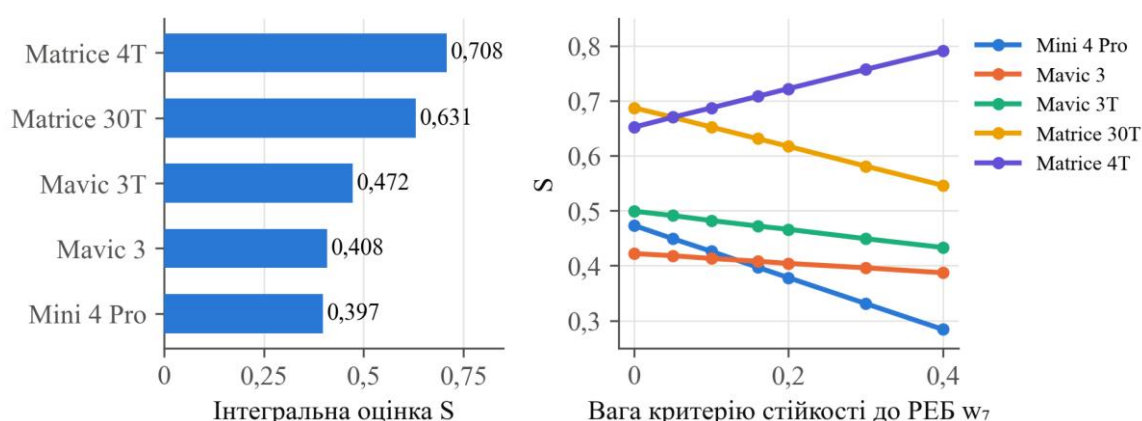


Рис. 17. Результати багатокритеріальної оцінки: а — інтегральні оцінки за базових ваг; б — чутливість до ваги критерію стійкості до РЕБ

За базових ваг найвищу оцінку має Matrice 4T (0,708), далі — Matrice 30T (0,631), Mavic 3T (0,472), Mavic 3 (0,408) і Mini 4 Pro (0,397). Matrice 30T лідирує за дальністю розпізнавання та захищеністю від середовища, однак програє за масою, вартістю та стійкістю до РЕБ. Аналіз чутливості (рис. 17, б) показує, що за нульової ваги критерію K7 перевага належить Matrice 30T (0,687 проти 0,652), а точка зміни лідера лежить поблизу $w_7 \approx 0,05$. Отже, для завдань поблизу лінії зіткнення, де стійкість до РЕБ є домінантною, вибір Matrice 4T є стійким, а для тилових і рятувальних завдань доцільнішим може бути Matrice 30T. Mini 4 Pro з найменшою масою та вартістю за зростання ваги K7 опускається на останнє місце, проте залишається раціональним вибором для ближньої розвідки й навчання операторів.

ОБГОВОРЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ

Мультироторні та літакові БпЛА

Мультикоптери набули популярності завдяки масовості серійного виробництва. Компанія DJI з 2013 р. посідає лідерські позиції в галузі (понад 75 % дронів у світі — її виробництва), що забезпечує максимальну якість продукції за мінімальної вартості: конкуренти за ту саму ціну пропонують гірші камери, стабілізацію та систему зв'язку. Крім вартості та компактності, мультиротори портативні, не



потребують спеціальних місць для зльоту, можуть бути малозумними та зависати в потрібній точці. Порівняння з БпЛА літакового типу наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Порівняння легких мультироторних і літакових БпЛА для аеророзвідки

Характеристика	Мультироторні	Літакового типу
Тривалість польоту	близько 30–45 хв	3–4 год (електродвигун), 8–20 год (ДВЗ)
Робоча висота	як правило, до 500 м	2–3 км
Зліт	з руки, з малих майданчиків, між деревами	катапульта або злітна смуга
Зависання над об'єктом	так	ні (крім конвертопланів)
Посадка	у довільному місці, без парашута	парашут (може демаскувати) або смуга
Глибина розвідки	обмежена каналом керування та РЕБ	більша; робота з підготовлених позицій у глибині своєї території

Отже, залежно від завдань обирають відповідне типове рішення, але для ефективного використання потрібно враховувати масу, розміри, тривалість польоту й заряджання, дальність керування, можливості збільшення камери, стійкість до завад від засобів РЕБ і можливість екстреного повернення.

Рекомендації щодо вибору та експлуатації

Крім критеріїв табл. 3, під час вибору та планування застосування рекомендовано враховувати:

1. Температурний режим роботи (для більшості моделей –10...40 °С, для Matrice 30T — –20...50 °С), що є критичним узимку.
2. Стійкість до вітру та опадів (клас захисту IP), яка визначає можливість роботи в несприятливу погоду.
3. Стійкість до завад: наявність візуальної навігації, логіки виявлення підробного сигналу та можливості переходу в АТТІ без втрати керованості.
4. Можливість роботи вночі (тепловізійний канал і його ефективна дальність за виразом (9)).
5. Можливість онлайн-трансляції, щоб дешифрувальники в режимі реального часу оцінювали ситуацію та наносили інформацію на карти систем ситуаційної обізнаності, наприклад DELTA [42].

Після виконання завдання важливо повернути апарат. Мультироторні коптери в цьому зручніші для малих груп: вони не потребують спеціалізованих місць для посадки й парашута, тоді як літакові БпЛА можуть залітати глибше та працювати з підготовлених позицій. Для платформ попередніх поколінь у районах із ризиком «жорсткого» спуфінгу рекомендовано апаратне відключення приймача GNSS і польоти в режимі АТТІ з досвідченим оператором.

Обмеження дослідження

Розрахунок за виразом (9) дає теоретичну верхню межу дальності без урахування атмосферного пропускання, стиснення відео й вібрацій; критерії Джонсона відповідають імовірності 50 % і не враховують маскування та контраст фону [21]. Вагові коефіцієнти визначено експертно, а вартість задано умовним індексом за ринковими цінами, тому абсолютні значення S_i слід розглядати як порівняльні. Натурні випробування стійкості до спуфінгу проведено для обмеженої кількості апаратів і епізодів, без контролю параметрів сигналу завади; платформи Autel EVO Max 4T, для яких виробник заявляє навігацію без GNSS [13], натурно не перевірялися.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропоновано методику багатокритеріальної оцінки легких мультироторних БпЛА для аеророзвідки, що ґрунтується на геометричній моделі ефективної дистанції спостереження. Модель поєднує обмеження каналу керування (радіогоризонт, перша зона Френеля, відношення завади/сигнал), енергетичний радіус і оптичну дальність, нормовану за критеріями Джонсона для людини, автомобіля та будівлі.

Введене поняття ефективної фокусної відстані пояснює межу корисності гібридного збільшення: для відеопотоку 1920 пікселів деталізація зростає лише до кратності, що дорівнює відношенню ширини сенсора до ширини потоку. Розрахункова дальність розпізнавання людини вдень становить від 252 м (Mini



4 Pro) до 4,2 км (Matrice 30T), дальність виявлення автомобіля в ІЧ-каналі — 818–1084 м, тобто нічна розвідка вимагає наближення до об'єкта.

Натурні випробування підтвердили, що сучасні БПЛА вразливі до засобів протидії, однак нові моделі частково долають ці проблеми. На прикладі Matrice 4T встановлено можливість зберегти апарат за потужної підміни координат завдяки виявленню підробного сигналу й візуальному позиціонуванню, визначати відстань до об'єкта лазерним далекоміром до 1800 м та виконувати польоти на безпечній дистанції завдяки гібридному збільшенню до 112×. Апарати попереднього покоління (Mavic 3, Mavic 3E) приймали підробний сигнал, а Mavic 3 було втрачено.

За базових ваг інтегральна оцінка становить 0,708 для Matrice 4T та 0,631 для Matrice 30T; зміна лідера відбувається за ваги критерію стійкості до РЕБ близько 0,05, що робить цей критерій визначальним для завдань поблизу лінії зіткнення.

Подальші дослідження передбачають натурну перевірку моделі (1)–(9) для різних типів об'єктів і погодних умов, уточнення ваг методом аналізу ієрархій за участю операторів, інструментальне вимірювання параметрів сигналу спуфінгу та розширення переліку платформ, зокрема Autel EVO Max 4T і БПЛА літакового типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hassanalіan, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones: A Review. *Prog. Aerosp. Sci.*, 91, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
2. Tachinina, O., Lysenko, A., & Kutieпов, V. (2022). Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics and Control Systems*, 4(74), 79–86. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.74.17354>
3. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
4. Bajić, M., & Potočnik, B. (2023). UAV Thermal Imaging for Unexploded Ordnance Detection by Using Deep Learning. *Remote Sens.*, 15(4), 967. <https://doi.org/10.3390/rs15040967>
5. Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (Eds.). (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications* (3rd ed.). Artech House.
6. Psiaki, M. L., & Humphreys, T. E. (2016). GNSS Spoofing and Detection. *Proc. IEEE*, 104(6), 1258–1270. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2526658>
7. Krishna, C. G. L., & Murphy, R. R. (2017). A Review on Cybersecurity Vulnerabilities for Unmanned Aerial Vehicles. In *2017 IEEE Int. Symp. on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, 194–199. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2017.8088163>
8. Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security Analysis of Drones Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations. *Internet of Things*, 11, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
9. Chamola, V., Kotesch, P., Agarwal, A., Naren, Gupta, N., & Guizani, M. (2021). A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Netw.*, 111, 102324. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
10. DJI. (2025). *Camera Drones: Mavic Series*. <https://www.dji.com/global/products/camera-drones#mavic-series>
11. DJI Enterprise. (2025). *Enterprise Drones*. <https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav#drones>
12. Autel Robotics. (2025). *EVO II Enterprise Drones*. <https://www.autelrobotics.com/productdetail/evo-ii-enterprise-drones/>
13. Autel Robotics. (2025). *EVO Max Series*. <https://www.autelrobotics.com/productdetail/evo-max-series/>
14. Бездельний, В., Шульга, О., Кулешов, О., & Донник, О. (2023). Удосконалення національної класифікації безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 1(50), 29–37. <https://doi.org/10.30748/ntips.2023.50.03>
15. Кульчицький, А., Висікан, О., Степанюк, О., Бабенко, В., & Колендзян, П. (2024). Безпілотні літальні апарати: поняття і класифікація під час проведення судових експертиз. *Криміналістика і судова експертиза*, (69), 337–346. <https://doi.org/10.33994/kndise.2024.69.32>
16. Міністерство оборони України. (2016). *Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України* (Наказ № 661 від 08.12.2016). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17>
17. Hamurcu, M., & Eren, T. (2020). Selection of Unmanned Aerial Vehicles by Using Multicriteria Decision-Making for Defence. *J. Math.*, 2020, 4308756. <https://doi.org/10.1155/2020/4308756>



18. Saaty, T. L. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Eur. J. Oper. Res.*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
19. Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
20. Johnson, J. (1958). Analysis of Image Forming Systems. In *Proc. Image Intensifier Symposium*, Fort Belvoir, VA, 249–273.
21. Sjaardema, T. A., Smith, C. S., & Birch, G. C. (2015). *History and Evolution of the Johnson Criteria* (SAND2015-6368). Sandia National Laboratories. <https://doi.org/10.2172/1222446>
22. Bareła, J., Kastek, M., Firmanty, K., & Trzaskawka, P. (2013). Determining the Range Parameters of Observation Thermal Cameras on the Basis of Laboratory Measurements. *Proc. SPIE*, 8896, 889610. <https://doi.org/10.1117/12.2028703>
23. Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2017). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications* (2nd ed.). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527693306>
24. Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal Cameras and Applications: A Survey. *Mach. Vis. Appl.*, 25(1), 245–262. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>
25. Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines. *Remote Sens.*, 12(5), 859. <https://doi.org/10.3390/rs12050859>
26. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges. *IEEE Commun. Mag.*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>
27. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H., & Debbah, M. (2019). A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 21(3), 2334–2360. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
28. Al-Hourani, A., Kandeepan, S., & Lardner, S. (2014). Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage. *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 3(6), 569–572. <https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>
29. Khawaja, W., Guvenc, I., Matolak, D. W., Fiebig, U.-C., & Schneckenburger, N. (2019). A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 21(3), 2361–2391. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2915069>
30. Kerns, A. J., Shepard, D. P., Bhatti, J. A., & Humphreys, T. E. (2014). Unmanned Aircraft Capture and Control via GPS Spoofing. *J. Field Robot.*, 31(4), 617–636. <https://doi.org/10.1002/rob.21513>
31. Schmidt, D., Radke, K., Camtepe, S., Foo, E., & Ren, M. (2016). A Survey and Analysis of the GNSS Spoofing Threat and Countermeasures. *ACM Comput. Surv.*, 48(4), 1–31. <https://doi.org/10.1145/2897166>
32. Altaweel, A., Mulkath, H., & Kamel, I. (2023). GPS Spoofing Attacks in FANETs: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 11, 55233–55280. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3281731>
33. Meheretu, S., Nigussie, E., Gebremeskel, G., & Hailesilassie, S. (2025). A Systematic Literature Review on Spoofing and Jamming Approaches in Unmanned Aerial Vehicles Navigation. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, 17, e3425. <https://doi.org/10.1590/jatm.v17.1396>
34. Nayfeh, M., Li, Y., Al Shamaileh, K., Devabhaktuni, V., & Kaabouch, N. (2023). Machine Learning Modeling of GPS Features with Applications to UAV Location Spoofing Detection and Classification. *Comput. Secur.*, 126, 103085. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.103085>
35. Gu, N., Xing, F., & You, Z. (2021). GNSS Spoofing Detection Based on Coupled Visual/Inertial/GNSS Navigation System. *Sens.*, 21(20), 6769. <https://doi.org/10.3390/s21206769>
36. International Telecommunication Union. (2019). *Recommendation ITU-R P.526-15: Propagation by Diffraction*. ITU-R. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526>
37. Poisel, R. A. (2011). *Modern Communications Jamming Principles and Techniques* (2nd ed.). Artech House.
38. DJI Enterprise. (2025). *Mavic 3 Enterprise Series — Specs*. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>
39. DJI. (2025). *DJI Mini 4 Pro — Specs*. <https://www.dji.com/mini-4-pro/specs>
40. DJI Enterprise. (2025). *Matrice 30 Series — Specs*. <https://enterprise.dji.com/matrice-30/specs>
41. DJI Enterprise. (2025). *Matrice 4 Series — Specs*. <https://enterprise.dji.com/matrice-4-series/specs>
42. Міністерство оборони України. (2025). *Система ситуаційної обізнаності DELTA: довідкова інформація*. <https://delta.mil.gov.ua/wiki/info/>

**Artem V. Platonenko**

Ph.D., associate professor
associate professor of the Department of Information and Cyber Security
named after Professor Volodymyr Buriachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-2962-5667
a.platonenko@kubg.edu.ua

Volodymyr Y. Sokolov

Ph.D., associate professor
associate professor of the Department of Information and Cyber Security
named after Professor Volodymyr Buriachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-9349-7946
v.sokolov@kubg.edu.ua

**MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF LIGHT MULTIROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLES
FOR AERIAL RECONNAISSANCE**

Abstract. The problem of justified selection of light multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) of Class I (micro and mini categories) for aerial reconnaissance, surveillance, fire adjustment, humanitarian demining and signal relaying under active electronic warfare is considered. It is shown that comparisons based on rated flight range and price do not reflect the real usefulness of a platform, since the observation result is determined simultaneously by control range, flight altitude, resolution and zoom of the optical and infrared (IR) channels, object type and resilience of the navigation system to interference. A geometric model of the effective observation distance is proposed that combines control-link constraints (radio horizon, first Fresnel zone, jamming-to-signal ratio), the energy radius and the optical range normalized by the Johnson criteria for three object types (person, vehicle, building). The concept of an effective focal length that accounts for the video-stream resolution limit is introduced, explaining the limit of usefulness of hybrid digital zoom. On this basis, a ten-criterion decision matrix is formed and five DJI platforms (Mini 4 Pro, Mavic 3, Mavic 3T, Matrice 30T, Matrice 4T) are evaluated. The calculated daytime person recognition range is from 252 m to 4.2 km, and the vehicle detection range in the IR channel is from 818 m to 1084 m. Field tests under “hard” GNSS spoofing (false position in Lima, Peru) showed that Matrice 4T detects the counterfeit signal, holds position using visual sensors in daytime and remains controllable in ATTI mode at night, whereas a previous-generation DJI Mavic 3 was lost despite software disabling of navigation. With baseline weights the integral score is 0.708 for Matrice 4T and 0.631 for Matrice 30T; sensitivity analysis shows that the leader changes once the weight of the EW resilience criterion exceeds 0.05. The results can be used to justify UAV selection by units and rescue services and to formulate requirements for future platforms.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aerial reconnaissance, electronic warfare, GNSS spoofing, coordinate substitution, Johnson criteria, thermal camera, multi-criteria assessment, effective observation distance, cybersecurity.

REFERENCES

1. Hassanalain, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones: A Review. *Prog. Aerosp. Sci.*, 91, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>
2. Tachinina, O., Lysenko, A., & Kutieпов, V. (2022). Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics and Control Systems*, 4(74), 79–86. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.74.17354>
3. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
4. Bajić, M., & Potočnik, B. (2023). UAV Thermal Imaging for Unexploded Ordnance Detection by Using Deep Learning. *Remote Sens.*, 15(4), 967. <https://doi.org/10.3390/rs15040967>
5. Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (Eds.). (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications* (3rd ed.). Artech House.



6. Psiaki, M. L., & Humphreys, T. E. (2016). GNSS Spoofing and Detection. *Proc. IEEE*, 104(6), 1258–1270. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2526658>
7. Krishna, C. G. L., & Murphy, R. R. (2017). A Review on Cybersecurity Vulnerabilities for Unmanned Aerial Vehicles. In *2017 IEEE Int. Symp. on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*, 194–199. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2017.8088163>
8. Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security Analysis of Drones Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations. *Internet of Things*, 11, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
9. Chamola, V., Kotesch, P., Agarwal, A., Naren, Gupta, N., & Guizani, M. (2021). A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. *Ad Hoc Netw.*, 111, 102324. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
10. DJI. (2025). *Camera Drones: Mavic Series*. <https://www.dji.com/global/products/camera-drones#mavic-series>
11. DJI Enterprise. (2025). *Enterprise Drones*. <https://www.dji.com/global/products/enterprise?site=enterprise&from=nav#drones>
12. Autel Robotics. (2025). *EVO II Enterprise Drones*. <https://www.autelrobotics.com/productdetail/evo-ii-enterprise-drones/>
13. Autel Robotics. (2025). *EVO Max Series*. <https://www.autelrobotics.com/productdetail/evo-max-series/>
14. Bezdielnyi, V., Shulha, O., Kulieshov, O., & Donnyk, O. (2023). Improvement of the national classification of unmanned aerial vehicles. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1(50), 29–37. <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.50.03>
15. Kulchytskyi, A., Vysikan, O., Stepaniuk, O., Babenko, V., & Kolendzian, P. (2024). Unmanned aerial vehicles: concept and classification during forensic examinations. *Kryminalistyka i sudova ekspertyza*, (69), 337–346. <https://doi.org/10.33994/kndise.2024.69.32>
16. Ministry of Defence of Ukraine. (2016). *On approval of the Rules for flights of unmanned aircraft systems of the state aviation of Ukraine* (Order No. 661 of 08.12.2016). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17>
17. Hamurcu, M., & Eren, T. (2020). Selection of Unmanned Aerial Vehicles by Using Multicriteria Decision-Making for Defence. *J. Math.*, 2020, 4308756. <https://doi.org/10.1155/2020/4308756>
18. Saaty, T. L. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Eur. J. Oper. Res.*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
19. Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
20. Johnson, J. (1958). Analysis of Image Forming Systems. In *Proc. Image Intensifier Symposium*, Fort Belvoir, VA, 249–273.
21. Sjaardema, T. A., Smith, C. S., & Birch, G. C. (2015). *History and Evolution of the Johnson Criteria* (SAND2015-6368). Sandia National Laboratories. <https://doi.org/10.2172/1222446>
22. Bareła, J., Kastek, M., Firmanty, K., & Trzaskawka, P. (2013). Determining the Range Parameters of Observation Thermal Cameras on the Basis of Laboratory Measurements. *Proc. SPIE*, 8896, 889610. <https://doi.org/10.1117/12.2028703>
23. Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2017). *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications* (2nd ed.). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527693306>
24. Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal Cameras and Applications: A Survey. *Mach. Vis. Appl.*, 25(1), 245–262. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>
25. Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines. *Remote Sens.*, 12(5), 859. <https://doi.org/10.3390/rs12050859>
26. Zeng, Y., Zhang, R., & Lim, T. J. (2016). Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges. *IEEE Commun. Mag.*, 54(5), 36–42. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>
27. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H., & Debbah, M. (2019). A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 21(3), 2334–2360. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
28. Al-Hourani, A., Kandeepan, S., & Lardner, S. (2014). Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage. *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 3(6), 569–572. <https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>
29. Khawaja, W., Guvenc, I., Matolak, D. W., Fiebig, U.-C., & Schneckenburger, N. (2019). A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 21(3), 2361–2391. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2915069>



30. Kerns, A. J., Shepard, D. P., Bhatti, J. A., & Humphreys, T. E. (2014). Unmanned Aircraft Capture and Control via GPS Spoofing. *J. Field Robot.*, 31(4), 617–636. <https://doi.org/10.1002/rob.21513>
31. Schmidt, D., Radke, K., Camtepe, S., Foo, E., & Ren, M. (2016). A Survey and Analysis of the GNSS Spoofing Threat and Countermeasures. *ACM Comput. Surv.*, 48(4), 1–31. <https://doi.org/10.1145/2897166>
32. Altaweel, A., Mulkath, H., & Kamel, I. (2023). GPS Spoofing Attacks in FANETs: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 11, 55233–55280. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3281731>
33. Meheretu, S., Nigussie, E., Gebremeskel, G., & Hailasilassie, S. (2025). A Systematic Literature Review on Spoofing and Jamming Approaches in Unmanned Aerial Vehicles Navigation. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, 17, e3425. <https://doi.org/10.1590/jatm.v17.1396>
34. Nayfeh, M., Li, Y., Al Shamaileh, K., Devabhaktuni, V., & Kaabouch, N. (2023). Machine Learning Modeling of GPS Features with Applications to UAV Location Spoofing Detection and Classification. *Comput. Secur.*, 126, 103085. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.103085>
35. Gu, N., Xing, F., & You, Z. (2021). GNSS Spoofing Detection Based on Coupled Visual/Inertial/GNSS Navigation System. *Sens.*, 21(20), 6769. <https://doi.org/10.3390/s21206769>
36. International Telecommunication Union. (2019). *Recommendation ITU-R P.526-15: Propagation by Diffraction*. ITU-R. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526>
37. Poisel, R. A. (2011). *Modern Communications Jamming Principles and Techniques* (2nd ed.). Artech House.
38. DJI Enterprise. (2025). *Mavic 3 Enterprise Series — Specs*. <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>
39. DJI. (2025). *DJI Mini 4 Pro — Specs*. <https://www.dji.com/mini-4-pro/specs>
40. DJI Enterprise. (2025). *Matrice 30 Series — Specs*. <https://enterprise.dji.com/matrice-30/specs>
41. DJI Enterprise. (2025). *Matrice 4 Series — Specs*. <https://enterprise.dji.com/matrice-4-series/specs>
42. Ministry of Defence of Ukraine. (2025). *DELTA Situational Awareness System: Reference Information*. <https://delta.mil.gov.ua/wiki/info/>

Отримано редакцією журналу / Received: 18.08.26

Прорецензовано / Revised: 30.08.26

Схвалено до друку / Accepted: 26.10.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.