

**СИСТЕМА РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ВПЛИВУ НА КАНАЛИ
КЕРУВАННЯ ТА ВІДЕОЗВ'ЯЗКУ БПЛА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
КВАДРИФІЛЯРНОЇ АНТЕНИ**

Бохан І.А. Белоусов О.Г. Лихограй В.Г.

e-mail: ivan.bokhan@nure.ua, oleksii.bielousov@nure.ua,
vasyl.lykhograi@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, КРІСТЗІ, ФОЕТ
м. Харків, Україна

The paper proposes a method for generating radio interference against control and video transmission channels of unmanned aerial vehicles under combat conditions. The main focus is on suppressing signals in typical communication bands (433 MHz, 868/915 MHz, 1.2–1.3 GHz, 2.4 GHz, and 5.8 GHz) used for telemetry, control, and FPV video transmission. The method is based on the use of a quadrifilar loop antenna (QLA), which provides circular polarization and uniform azimuthal coverage, thereby increasing the effectiveness of interference against moving targets

У сучасних умовах бойових дій безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко використовуються для розвідки, коригування вогню та ураження цілей, що обумовлює необхідність розробки ефективних засобів радіоелектронної протидії. Одним із ключових напрямків є постановка радіозавад каналам керування, телеметрії та передачі відео, порушення яких призводить до втрати керованості апарата або деградації інформаційного обміну.

Канали керування та телеметрії БПЛА, як правило, використовують лінійну поляризацію (вертикальну або горизонтальну), тоді як відео канали, особливо FPV-системи, часто застосовують кругову поляризацію (RHCP або LHCP) для підвищення завадостійкості. При цьому антени з круговою поляризацією мають властивість ефективно взаємодіяти як із сигналами кругової поляризації, так і з лінійно поляризованими сигналами. Відомо, що при прийомі (або впливі) сигналу з лінійною поляризацією круговою антеною виникає втрати узгодження поляризації близько 3 дБ [1], що є прийнятним з точки зору задач постановки завад. Таким чином, використання антен із круговою поляризацією дозволяє забезпечити ефективний вплив на сигнали з вертикальною, горизонтальною та круговою поляризаціями без необхідності точного орієнтування антени в просторі.

Узагальнена схема системи радіоелектронного впливу зображена на рис. 1. Вона включає приймальну антену, блок виявлення та аналізу параметрів сигналів (поляризація, частота, спектральні характеристики, рівень потужності тощо), блок прийняття рішення, блок формування сигналу впливу (чи декілька), підсилювач потужності та передавальну антену (чи декілька).

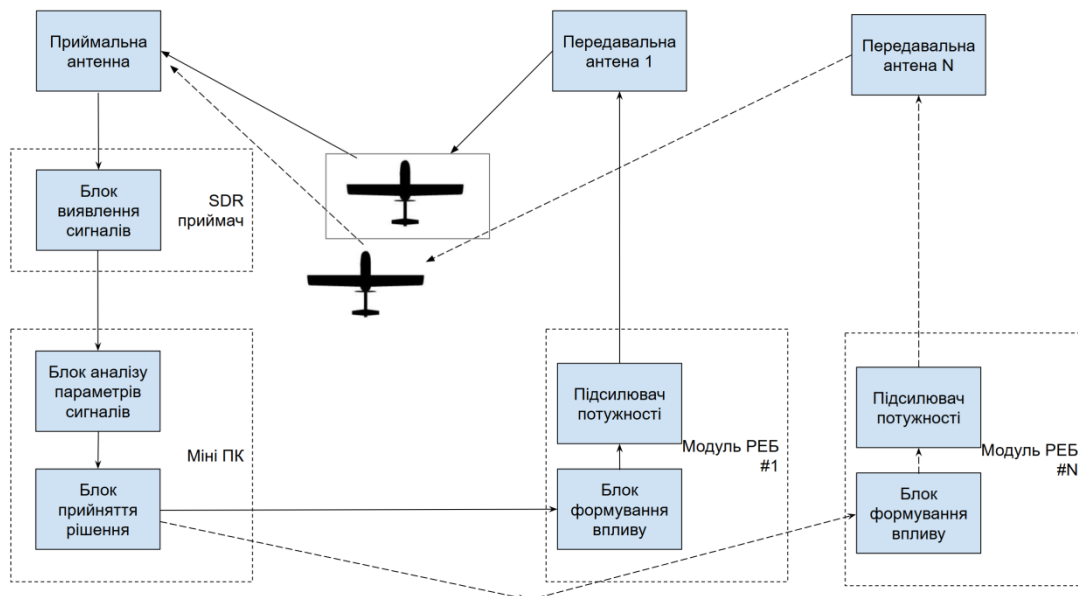


Рисунок 1 – Узагальнена схема системи радіоелектронного впливу

Блок прийняття рішення реалізується на основі обчислювального модуля (міні-ПК), який, використовуючи попередньо сформовану базу даних сигналів різних типів БПЛА, здійснює ідентифікацію джерела випромінювання та визначає доцільність формування завадового впливу.

Блок формування сигналу або сигналів (декілька) впливу (постановник завад), подано на рис.2.

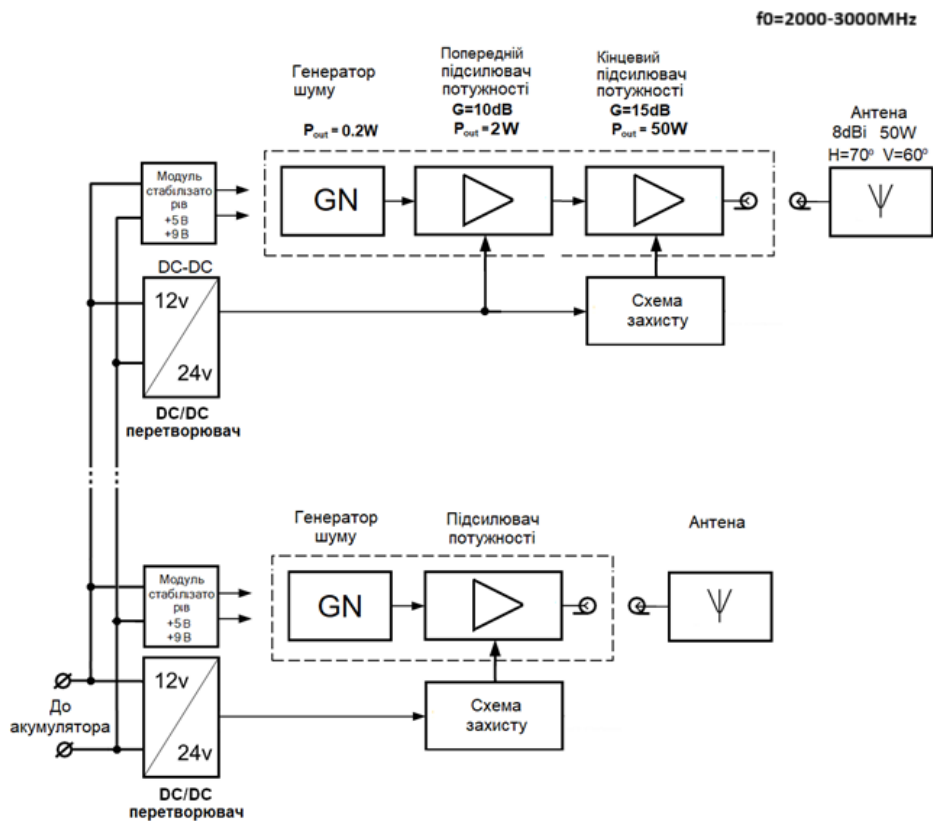


Рисунок 2 – Блок формування сигналів впливу тактичного рівня

Постановник завад для протидії FPV-дронам складається з таких компонентів:

- зарядного пристрою;
- блоку акумуляторних батарей із необхідною ємністю;
- DC/DC перетворювача напруги;
- стабілізованого джерела живлення;
- модулів для формування спрямованих завад у робочому частотному діапазоні (щонайменше 3 модуля).

Модуль-формувавч спрямованих завад може складатися з таких компонентів:

- генератора завад у заданій смузі частот ($P_{out} = 0,2 \text{ Вт} / 23 \text{ дБм}$);
- попереднього каскаду підсилювача потужності ($G = 10 \text{ дБ}$, $P_{out} = 2 \text{ Вт} / 33 \text{ дБм}$);
- кінцевого каскаду підсилювача потужності ($G = 15 \text{ дБ}$, $P_{out} = 50 \text{ Вт} / 47 \text{ дБм}$);
- схеми захисту кінцевого підсилювача потужності;
- випромінювальної антени ($G = 5 \text{ дБі}$, $P_{out} = 50 \text{ Вт}$).

Під час роботи постановника завад модуль формування сигналів генерує завади в діапазонах 868 МГц, 2400 МГц і 5800 МГц. Закони формування сигналів повинні бути адаптовані для імітації реальних каналів управління, які використовуються в популярних БПЛА, таких як DJI Mavic 2, Avata, Autel 640t, а також FPV-дронів з керуванням через TBS Crossfire, ELRS тощо та відеопередавачами у діапазонах 2.4 і 5.8 ГГц. Це дає змогу використовувати відносно малопотужні передавачі (до 5 Вт) для створення стійких завад, здатних ефективно блокувати управління дронами.

Такий підхід зменшує випромінювану потужність, запобігає перегріванню навколишнього середовища та мінімізує вплив на особовий склад («не кип'ятить мізки»). Він також знижує помітність оператора для засобів радіотехнічної розвідки противника, зменшує габарити обладнання та забезпечує комфортний час автономної роботи пристрою.

Постановник завад проти FPV-дронів краще увімкнути разом із схемою захисту кінцевого каскаду підсилювача потужності, оскільки значні рівні потужності в підсилювачі ($>50 \text{ Вт}$) при нештатних ситуаціях з навантаженням (режими відкритого або короткого замикання, неузгоджене навантаження антени тощо) можуть призвести до його виходу з ладу або деградації. Тому схема захисту повинна, наприклад, швидко реагувати на зміни коефіцієнта стоячих хвиль (КСВН) і автоматично відключати підсилювач від джерела живлення.

Постановник завад використовує різні випромінювальні антени для роботи в заданих (різних) частотних діапазонах, при цьому на ринку доступна широка номенклатура таких антен.

Оскільки генератори завад і підсилювачі потужності мають різні вимоги до напруги живлення, необхідно застосовувати різні DC/DC перетворювачі напруги.

Постановник завад для FPV-дронів включає блок акумуляторних батарей, що працює разом із зарядним пристроєм.

Споживану потужність постановника завад можна розрахувати є такий спосіб. У вихідному каскаді підсилювача потужності з $P_{\text{вих}} = 50$ Вт зазвичай використовується транзистор, що працює в режимі класу А з ККД $\eta = 0,3-0,4$. Отже, споживана потужність підсилювача буде приблизно $P_{\text{спож}} = 125-166$ Вт (для зручності візьмемо $P_{\text{спож}} = 150$ Вт). При напрузі перетворювача для живлення підсилювача потужності $U = 24$ В, допустимий струм споживання підсилювача складе (для зручності візьмемо $I_{\text{спож}} = 6$ А):

$$I_{\text{спож}} = 150 \text{ Вт} / 24 \text{ В} = 6,25 \text{ А}.$$

Щоб засіб РЕП працював безперервно хоча б 2 години, ємність повністю зарядженої акумуляторної батареї повинна становити

$$I_{\text{спож}} \times T = 6 \text{ А} \times 2 \text{ год} = 12 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Залежно від кількості модулів (наприклад, 3), загальна споживана потужність тільки для підсилювачів потужності складе $P_{\text{спож}} = 450$ Вт. До цієї потужності потрібно додати споживання таких компонентів, як генератор шуму, схема керування, схема захисту підсилювача потужності тощо. Тому загальна споживана потужність, ймовірно, складе $P_{\text{спож}} = 500$ Вт і більше.

Така структура забезпечує виявлення активних каналів зв'язку БПЛА, оцінювання їх основних параметрів та формування радіоелектронного впливу з урахуванням характеристик сигналу і умов поширення.

Запропоновані постановники завад проти FPV-дронів (наприклад, окопний РЕП) можуть бути побудовані виключно з покупних компонентів. Однак для зниження вартості пристрою пропонується використовувати власноруч виготовлені компоненти, такі як антени.

З огляду на наведене, ключовим елементом системи радіоелектронного впливу є передавальна антена, оскільки саме вона визначає просторові та поляризаційні характеристики випромінюваного сигналу, а отже – ефективність придушення каналів зв'язку БПЛА. Вибір типу антени безпосередньо впливає на зону покриття, рівномірність випромінювання та здатність системи впливати на сигнали з різними типами поляризації.

У зв'язку з цим доцільно більш детально розглянути застосування антен із круговою поляризацією, зокрема квадрифілярної рамкової антени (QFLA/КРА) рис.3, яка завдяки своїм характеристикам забезпечує ефективне покриття в широкому секторі та узгодження з сигналами різної поляризації [2]. Це обумовлює її перспективність для використання в системах постановки радіозавад каналам керування та передачі відео БПЛА.

На рис. 4-5 наведені графіки основних характеристик КРА розробленої для смуги частот 800-900 МГц. Математичне моделювання проводилось за допомогою програмного комплексу Ansys HFSS.



Рисунок 3 – Приклад практичних конструкцій квадрифілярної рамкової антени для засобів купольного/ окопного РЕБ

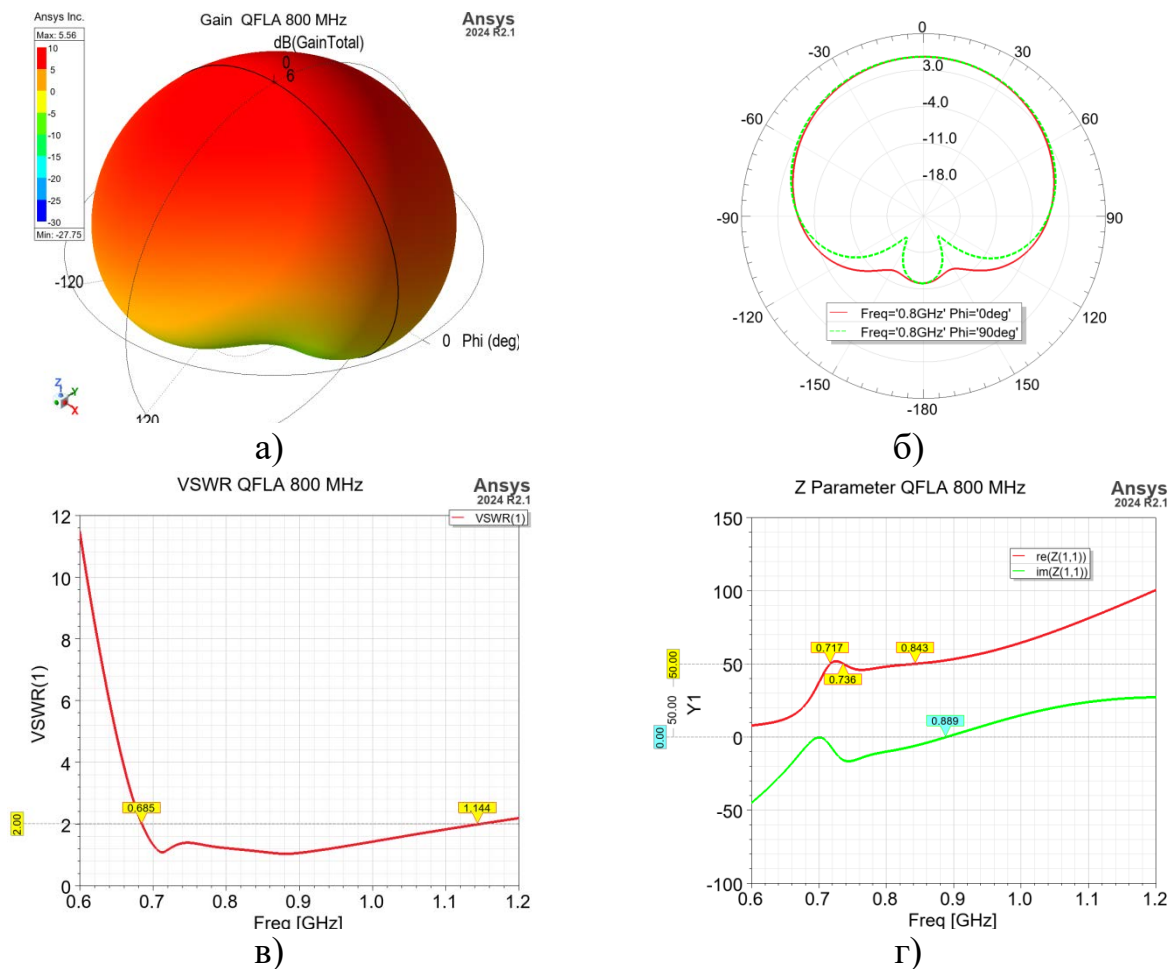


Рисунок 4 – Графіки основних характеристик КРА

- а) 3D діаграма спрямованості КРА;
- б) діаграма спрямованості в розрізі при 0° та 90° ;
- в) КСХ антени;
- г) активної та реактивної складової вхідного імпедансу.

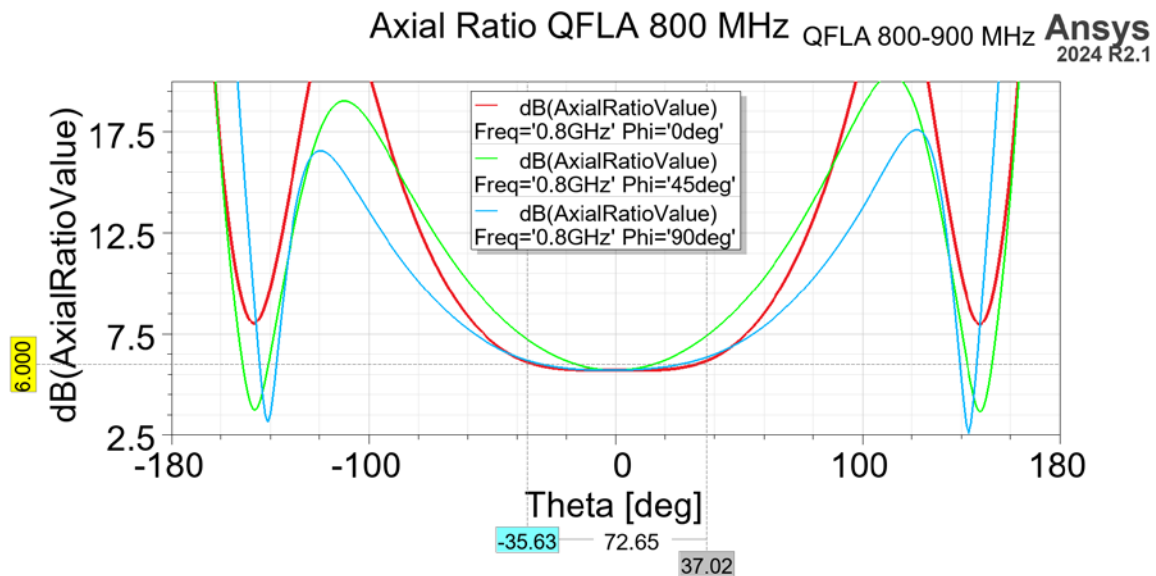


Рисунок 5 – Графік коефіцієнта осьового відношення (axial ratio) КРА при різних кутах ϕ : червона крива $\phi=0^\circ$; зелена крива $\phi=45^\circ$; синя крива $\phi=90^\circ$.

Отримані результати демонструють ефективне узгодження антени в робочому діапазоні частот ($K_{CX} < 2$). У смузі 800–900 МГц, на яку розрахована антена, характеристики K_{CX} та вхідного імпедансу відповідають вимогам і не мають зауважень. Діаграма спрямованості характеризується широким головним пелюстком на рівні -3 дБ із кутом покриття близько 120° , що забезпечує ефективне просторове перекриття. При цьому спостерігається значне пригнічення випромінювання в зворотному напрямку, що свідчить про високі спрямовані властивості антени.

Аналіз графіка показує, що в кутовому секторі близько $\pm 75^\circ$ спостерігається мінімум коефіцієнта осьового відношення, що відповідає поляризації, найбільш наближеній до кругової. Це свідчить про ефективну роботу антени в широкому просторовому секторі з точки зору поляризаційних властивостей.

Слід зазначити, що аналогічні розрахунки та моделювання можуть бути виконані для інших частотних діапазонів: 433 МГц, 868/915 МГц, 1.2–1.3 ГГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц та по останнім даним 8–10 ГГц. Отримані результати є репрезентативними для даної конструкції антени, а її адаптація до інших діапазонів (зокрема для задач придушення каналів керування або моніторингу) здійснюється шляхом масштабування геометричних параметрів без зміни принципу роботи та основних електродинамічних властивостей.

Запропонований метод постановки радіо завад із використанням антени типу QFLA забезпечує ефективне придушення каналів керування та передачі відео БПЛА в заданому частотному діапазоні. Результати моделювання підтверджують добрі узгоджувальні, просторові та поляризаційні характеристики антени, що забезпечують стабільний радіоелектронний

вплив на рухомі об'єкти. Система керування дозволяє реалізувати одночасне або селективне вмикання декількох каналів радіоелектронного впливу в різних частотних діапазонах, що розширює функціональні можливості систем радіоелектронної боротьби. Такий підхід може бути адаптований до інших частотних діапазонів шляхом масштабування конструкції антени.

Список використаних джерел:

1. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. – 1100 p.
2. Бохан І.А., Лихограй В.Г., Гавва Д.С. АНТЕНА МОХОН 800 МГц. Частина 2: моделювання антени // Збірник доповідей за матеріалами XXVII Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті», Харків: ХНУРЕ, 2025 р.