

УДК 621.396.677:629.735.05



**К. О. Спорішев**



**Б. В. Іванов**

## **МЕТОД ПРОСТОРОВО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РАДІОКАНАЛІВ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ**

*У статті розглянуто проблему підвищення завадостійкості радіоканалів управління безпілотними літальними апаратами в умовах складної та динамічної радіоелектронної обстановки, характерної для сучасних воєнних і спеціальних операцій. Показано, що традиційні підходи до побудови радіоканалів управління БпЛА, які базуються на використанні фіксованих антенних діаграм спрямованості та резервуванні потужності передавача, не забезпечують належного рівня надійності зв'язку за наявності активних і пасивних джерел радіоперешкод.*

*Розроблений метод просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління безпілотними літальними апаратами, що ґрунтується на спільному виборі параметрів діаграми спрямованості бортової антенної системи та режимів енергетичного керування передавачем з урахуванням просторового розташування наземних пунктів управління, джерел завад і траєкторії польоту БпЛА. Запропоновано модель автоматизованого супроводження точки розташування наземного пункту управління бортовою антенною системою, яка забезпечує постійну орієнтацію головного пелюстка діаграми спрямованості у напрямку корисного сигналу.*

*К л ю ч о в і с л о в а: безпілотні літальні апарати, заводова обстановка, радіоканали управління, антенні пристрої, радіоелектронна боротьба, обробка сигналів, навігація.*

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах широкого застосування БпЛА у військовій, спеціальній та цивільній сферах ключовою передумовою ефективного виконання ними завдань є забезпечення надійного та безперервного управління БпЛА з наземного пункту управління. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах складної та динамічної заводої обстановки, що формується внаслідок дії засобів радіоелектронної боротьби, взаємних перешкод від інших радіоелектронних засобів, а також впливу умов поширення радіохвиль [1 – 5, 7 – 9].

Аналіз практики експлуатації БпЛА свідчить, що традиційні підходи до побудови радіоканалів управління, які передбачають використання фіксованих або слабоадаптивних антенних систем і резервування потужності передавача, не забезпечують необхідного рівня завадостійкості на всіх ділянках траєкторії польоту.

Такі підходи призводять до нераціонального використання енергетичних ресурсів БпЛА, збільшення ймовірності втрати керування в зонах інтенсивних завад та зниження загальної ефективності застосування безпілотних авіаційних комплексів [7 – 10].

Додатковою проблемою є недостатня формалізація процесів урахування просторового розташування наземних пунктів управління, джерел радіоперешкод і траєкторії руху БпЛА під час проектування та управління радіоканалами. У більшості існуючих рішень просторові та енергетичні параметри радіоканалу оптимізуються окремо, без їх узгодженого врахування в єдиній математичній моделі, що обмежує можливості адаптації системи управління до змін радіоелектронної обстановки в реальному часі.

Отже, наукова проблема полягає у відсутності комплексного методу просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління БпЛА, який би забезпечував гарантований рівень завадостійкості протягом усього польоту за умов жорстких енергетичних обмежень та дії різномірних джерел радіоперешкод. Вирішення цієї проблеми потребує розроблення формалізованого математичного апарату, що поєднує просторове керування діаграмою спрямованості бортової антенної системи з адаптивним енергетичним керуванням радіоканалом управління.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання підвищення завадостійкості та енергетичної ефективності радіоканалів управління БпЛА широко розглядаються у вітчизняних і зарубіжних наукових дослідженнях. У працях українських учених значну увагу приділено проблемам захисту радіоканалів управління БпЛА в умовах впливу навмисних і ненавмисних радіоперешкод, а також особливостям їх функціонування у складній електромагнітній обстановці.

Зарубіжні дослідження зосереджені переважно на питаннях енергетичної оптимізації та оптимізації траєкторій польоту БпЛА з метою підвищення ефективності безпроводового зв'язку. У працях [1, 2, 4] запропоновано методи мінімізації енергоспоживання систем зв'язку БпЛА з урахуванням траєкторії руху, а також особливостей каналу. У сучасних працях також розглядаються підходи до підвищення енергетичної ефективності UAV-комунікацій із використанням допоміжних інтелектуальних поверхонь та когнітивних радіосистем.

У статті [3] показано, що поєднання адаптивних та інтелектуальних методів забезпечує підвищення стійкості каналів зв'язку та знижує ризик втрати керування дронами. Зроблено висновок про доцільність використання гібридних рішень, які інтегрують класичні алгоритми цифрової обробки сигналів з методами штучного інтелекту. У дослідженні [5] запропоновано підходи до моделювання самоорганізації груп безпілотних апаратів, що опосередковано впливає на вимоги до стійкості каналів управління та обміну даними. У праці [6] розглянуто моделі захисту каналів радіозв'язку підрозділів Національної гвардії України, зокрема в умовах міської забудови, де спостерігається підвищений рівень завад та багатоприменеве поширення сигналів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний з оцінюванням заводої обстановки та просторових умов застосування БпЛА. У статті [7] запропоновано методи визначення зон безпечного польоту БпЛА на основі моделей поширення радіохвиль, що створює передумови для просторової оптимізації радіоканалів управління. У дослідженні [9] розглянуто комплексні рішення для заводозахищених радіоліній передавання даних і керування безпілотними літальними апаратами.

У низці праць досліджено адаптацію систем радіозв'язку БпЛА до умов дії радіоелектронної боротьби. Зокрема у публікації [8] розглядаються технічні рішення щодо підвищення захищеності радіоліній спеціального зв'язку БпЛА. У статті [10] досліджуються методи адаптації радіозв'язку тактичної ланки управління до умов навмисних завад, що є актуальним і для безпілотних авіаційних комплексів.

Разом з тим аналіз наявних досліджень показує, що у більшості праць просторові аспекти формування діаграми спрямованості бортових антенних систем та енергетичні параметри радіоканалу управління розглядаються окремо. Недостатньо уваги приділено їх спільній оптимізації з урахуванням конкретного просторового розташування наземних пунктів управління, джерел радіоперешкод і траєкторії польоту БпЛА. Це зумовлює необхідність розроблення комплексного методу просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління, що й визначає актуальність і наукову спрямованість даної статті.

**Метою статті** є розроблення методу просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління безпілотним літальним апаратом, який базується на цілеспрямованому використанні бортових антенних систем із заданою діаграмою спрямованості та враховує розташування наземних пунктів управління, можливих джерел завад і типових траєкторій польоту.

**Виклад основного матеріалу.** Для ділянки траєкторії у момент часу  $t$  рівень сигналу від наземного пункту управління (НПУ) на борту БпЛА описується відомим рівнянням радіолінії [6 – 10]

$$P_s(t) = P_t(t) \cdot G_t^{(g)}(\theta_g(t), \varphi_g(t)) \cdot G_r^{(u)}(\theta_g(t), \varphi_g(t)) \cdot L_s^{-1}(t), \quad (1)$$

де  $P_t(t)$  – потужність передавача НПУ в момент часу  $t$ ;

$G_t^{(g)}(\theta_g(t), \varphi_g(t))$  – коефіцієнт підсилення антени НПУ в напрямку БпЛА;

$G_r^{(u)}(\theta_g(t), \varphi_g(t))$  – коефіцієнт підсилення бортової антени в напрямку на НПУ;

$L_s^{-1}(t)$  – втрати потужності на трасі (функція від дальності, частоти, умов поширення).

Для  $m$ -го джерела завад вираз (1) матиме такий вигляд:

$$P_{i,m}(t) = P_{i,m}(t) \cdot G_{i,m}^{(g)}(\theta_m(t), \varphi_m(t)) \cdot G_r^{(u)}(\theta_m(t), \varphi_m(t)) \cdot L_{i,m}^{-1}(t). \quad (2)$$

Сумарну потужність завад можна записати як

$$P_i(t) = \sum_{m=1}^M P_{i,m}(t). \quad (3)$$

Тоді миттєве відношення сигнал / завада+шум у радіоканалі управління:

$$\gamma(t) = \frac{P_s(t)}{P_i(t) + N_0 B}, \quad (4)$$

де  $N_0$  – спектральна густина шуму;  
 $B$  – смуга пропускання.

Діаграму спрямованості бортової антени  $G_r^{(u)}(\theta, \varphi)$  зазвичай можна описати набором параметрів  $a$  (кут нахилу / азимут, ширина головної пелюстки, рівень бічних пелюсток, режим перемикання секторів тощо):

$$G_r^{(u)}(\theta, \varphi) = G_r^{(u)}(\theta, \varphi; a). \quad (5)$$

Так само потужність передавача (з боку НПУ або БПЛА) розглядається як керований параметр  $P_t(t)$ , який обмежений енергетичними ресурсами

$$\int_0^T P_t(t) dt \leq E_{\max}. \quad (6)$$

Суть методу – знайти такі  $a$  та  $P_t(t)$ , які забезпечують необхідний рівень завадостійкості на всій траєкторії польоту БПЛА або її критичних ділянках за умови мінімально можливих енергетичних витрат.

Постановка задачі дослідження має такий вигляд:

$$\max(a, P_t(t)), \quad \min(t \in [0, T]), \quad \gamma(t; a, P_t(t)), \quad (7)$$

за умов

$$\gamma(t; a, P_t(t)) \geq \gamma_{\min}, \quad a \in A, \quad (8)$$

де  $\gamma_{\min}$  – нормативне мінімальне відношення сигнал / завада+шум для надійного приймання команд;  
 $A$  – допустима область параметрів антенної системи (технічні обмеження, конструкція, вимоги сертифікації).

Метод підбирає форму та орієнтацію антени, а також розподіл потужності так, щоб по всій траєкторії руху БПЛА «дивився» максимально на НПУ і мінімально – на джерела завад, не виходячи за енергетичні ліміти.

Для кожного моменту часу  $t$  (або точки траєкторії польоту БПЛА) відомі:

- координати БПЛА  $r_u(t)$ ;
- координати НПУ  $r_g$ ;
- координати джерел завад  $r_{i,m}$ .

На їх основі обчислюються кути приходу сигналу / завад  $(\theta_g(t), \varphi_g(t))$ ,  $(\theta_m(t), \varphi_m(t))$ . Метод передбачає:

- просторову оптимізацію – вибір параметрів  $a$ , які формують діаграму спрямованості з максимумом у напрямку  $(\theta_g, \varphi_g)$  та мінімумами у напрямках  $(\theta_m, \varphi_m)$ ;
- енергетичну оптимізацію – адаптацію  $P_t(t)$  (наприклад, зниження потужності на ділянках з малими втратами і підвищення – на ділянках з потенційно складною радіоелектронною обстановкою, щоб виконувались  $\gamma(t) \geq \gamma_{\min}$  та обмеження по  $E_{\max}$ ).

Отже, порівнюючи з традиційними підходами (фіксована діаграма спрямованості антени + «грубе» резервування потужності), запропонований метод формалізує процес проєктування і управління

радіоканалом як задачу просторово-енергетичної оптимізації з урахуванням конкретних сценаріїв польоту, що й становить сутність наукової новизни цього дослідження.

Запропонований метод просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління БпЛА полягає в спільному виборі параметрів діаграми спрямованості бортової антени та енергетичних параметрів сигналу (потужність, часова / маршрутна алокація) з урахуванням просторового розташування:

- наземних пунктів управління;
- можливих джерел радіоперешкод;
- типової траєкторії польоту БпЛА.

З метою реалізації методу просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління БпЛА необхідно також описати модель автоматизованого супроводження точки розташування НПУ бортовою антенною системою БпЛА. Мета моделі – описати, як бортова антена БпЛА автоматично «тримає» головний пелюсток діаграми спрямованості на НПУ під час руху апарата по траєкторії, забезпечуючи максимальний рівень корисного сигналу та якомога мінімальні рівні випромінювання у бік джерел завад.

*Вихідні дані (геометрія задачі).* Нехай у деякий момент часу  $t$ :

- вектор радіуса положення БпЛА

$$r_u(t) = (x_u(t), y_u(t), z_u(t));$$

- вектор радіуса положення НПУ (стаціонарна точка)

$$r_g = (x_g, y_g, z_g);$$

- положення  $m$ -го джерела завад

$$r_{i,m} = (x_{i,m}, y_{i,m}, z_{i,m}), \quad m = 1, \dots, M.$$

Вектор від БпЛА до НПУ

$$R_g(t) = r_g - r_u(t).$$

Одиничний вектор напрямку на НПУ

$$n_g(t) = \frac{R_g(t)}{\|R_g(t)\|}.$$

Аналогічно для  $m$ -го джерела завад:

$$R_{i,m}(t) = r_{i,m} - r_u(t), \quad n_{i,m}(t) = \frac{R_{i,m}(t)}{\|R_{i,m}(t)\|}.$$

*Кутові координати напрямку на НПУ.* Напрямок на НПУ у бортовій системі координат зручно задати у сферичних координатах – азимут  $\varphi_g(t)$  та кут місця  $\theta_g(t)$ :

$$\varphi_g(t) = \arctan2(n_{g,y}(t), n_{g,x}(t)),$$

$$\theta_g(t) = \arcsin(n_{g,z}(t)),$$

де  $n_{g,y}(t)$ ,  $n_{g,x}(t)$ ,  $n_{g,z}(t)$  – проєкції вектора  $n_g(t)$  на осі бортової системи координат.

Для кожного джерела завад аналогічно:

$$\varphi_{i,m}(t) = \arctan2(n_{i,m,y}(t), n_{i,m,x}(t)),$$

$$\theta_{i,m}(t) = \arcsin(n_{i,m,z}(t)).$$

*Орієнтація бортової антени та система автоматизованого супроводження.* Нехай головний пелюсток діаграми спрямованості бортової антени описується орієнтаційними кутами антени  $\varphi_a(t)$ ,  $\theta_a(t)$ , які визначають напрямок осі антени (борайт) у бортовій системі координат. Завданням автоматизованого супроводження є забезпечення рівнянь

$$\varphi_a(t) \approx \varphi_g(t), \quad \theta_a(t) \approx \theta_g(t)$$

на всіх ділянках траєкторії, тобто звести до мінімуму кутову похибку наведення на НПУ. Введемо вектор похибки наведення

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_\varphi(t) \\ e_\theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_g(t) - \varphi_a(t) \\ \theta_g(t) - \theta_a(t) \end{bmatrix}.$$

Модель контурів управління приводами антени можна задати у вигляді простого П-регулятора

$$\varphi_a(t) = k_\varphi \cdot e_\varphi(t), \quad \theta_a(t) = k_\theta \cdot e_\theta(t),$$

де  $k_\varphi, k_\theta > 0$  – коефіцієнти підсилення регуляторів.

Отже, система автоматично змінює орієнтацію антени так, щоб вона «супроводжувала» точку розташування НПУ при зміні положення БпЛА (тобто при зміні  $r_u(t)$ ).

*Діаграма спрямованості та зв'язок із перешкодозахищеністю.* Діаграма спрямованості антени у бортовій системі координат задається функцією

$$G_r^{(u)}(\theta, \varphi; a),$$

де  $a$  – параметри форми діаграми спрямованості (ширина головного пелюстка, рівень бічних пелюстків тощо).

При автоматизованому супроводженні НПУ максимум діаграми спрямованості постійно направлений уздовж  $(\theta_a(t), \varphi_a(t)) \approx (\theta_g(t), \varphi_g(t))$ , а у напрямках  $(\theta_{i,m}(t), \varphi_{i,m}(t))$  бажано забезпечити мінімальні значення:

$$G_r^{(u)}(\theta_g(t), \varphi_g(t)) \rightarrow \max,$$

$$G_r^{(u)}(\theta_{i,m}(t), \varphi_{i,m}(t)) \rightarrow \min, \quad m = 1, \dots, M.$$

Тоді миттєве відношення сигнал / завада+шум

$$\gamma(t) = \frac{P_t(t) \cdot G_t^{(g)}(\theta_g(t), \varphi_g(t)) \cdot G_r^{(u)}(\theta_g(t), \varphi_g(t))}{\sum_{m=1}^M P_{i,m}(t) \cdot G_{i,m}^{(g)}(\theta_{i,m}(t), \varphi_{i,m}(t)) \cdot G_r^{(u)}(\theta_{i,m}(t), \varphi_{i,m}(t)) + N_0 B},$$

безпосередньо залежить від того, наскільки точно модель автоматизованого супроводження «тримає» антену на НПУ та яка форма діаграми у бік джерел завад.

*Зв'язок із просторово-енергетичною оптимізацією.* Запропонований метод просторово-енергетичної оптимізації реалізується через:

– автоматизоване супроводження точки розташування НПУ бортовою антеною – мінімізація кутової похибки  $e(t)$ ;

– оптимальний вибір параметрів діаграми спрямованості  $a$ , які забезпечують потрібне співвідношення (максимум підсилення в напрямку на НПУ; мінімум – у напрямках на джерела завад).

Формально це можна записати як задачу мінімізації функціонала

$$J = \int_0^T \omega_1 \|e(t)\|^2 + \omega_2 \sum_{m=1}^M G_r^{(u)}(\theta_{i,m}(t), \varphi_{i,m}(t)) dt \rightarrow \min(a, u_a(t)),$$

де  $\omega_1, \omega_2$  – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритет точності наведення та пригнічення завад; управління  $u_a(t)$  формується системою автоматизованого супроводження на основі  $e(t)$ .

Модель автоматизованого супроводження НПУ є основою реалізації просторової частини методу. Вона забезпечує механізм супроводження головним пелюстком антени БпЛА точки розташування НПУ вздовж траєкторії польоту, а форма діаграми (через  $a$ ) та енергетичні параметри забезпечують потрібну перешкодозахищеність.

## Висновки

Запропоновано метод просторово-енергетичної оптимізації радіоканалів управління БПЛА, який розглядає формування діаграми спрямованості бортової антени та управління потужністю передавача як єдину оптимізаційну задачу з урахуванням реальної радіоелектронної обстановки.

Розроблено математичну модель радіоканалу управління, що дозволяє оцінювати миттєве відношення сигнал / завада+шум на різних ділянках траєкторії польоту БПЛА з урахуванням впливу множинних джерел завад.

Запропоновано модель автоматизованого супроводження точки розташування наземного пункту управління бортовою антенною системою, яка забезпечує постійну орієнтацію головного пелюстка діаграми спрямованості у напрямку корисного сигналу.

Показано, що використання просторово-енергетичної оптимізації дозволяє зменшити енергетичні витрати радіоканалу управління за одночасного забезпечення нормативного рівня завадостійкості на критичних ділянках польоту.

Отримані результати можуть бути використані у проектуванні перспективних систем управління БПЛА, а також у розробленні програмного забезпечення для імітаційного моделювання та підтримання прийняття рішень у сфері радіоелектронного забезпечення безпілотних авіаційних комплексів.

Напрямами подальших досліджень вважаємо створення у середовищі імітаційного моделювання Simulink моделі супроводження та апробацію створених метода та моделі.

## Перелік джерел посилання

1. Zeng, Y., Zhang, R. *Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization*. arXiv:1608.01828, 2016. arXiv
2. Zeng, Y., Xu, J., Zhang, R. *Energy Minimization for Wireless Communication with Rotary-Wing UAV*. arXiv:1804.02238, 2018. arXiv
3. Kriuchkova, Larysa & Vorokhob, Nikita. (2025). Adaptive methods to counter active noise jamming. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*. 2. Pp. 455–472. 10.28925/2663-4023.2025.30.987. <https://www.researchgate.net/publication/397991375>
4. Shen, X. et al. *Energy Efficiency Optimization for UAV-RIS-Assisted Wireless Powered Communication Networks*. *Drones*, 2025. MDPI.
5. Тристан А. В., Жуков Д. І. Моделі самоорганізації колективу однорідних безпілотних літальних апаратів при рішенні слабоформалізованих завдань. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2024. № 2 (55). С. 32–39.
6. Іохов О. Ю., Малюк В. Г., Ляшенко Г. Т. Модель захисту каналу радіозв'язку підрозділів Національної гвардії України у міських умовах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, 2017. Вип. 5 (45). С. 141–143.
7. Спорішев К. О., Бордунова К. І., Білан І. А. Метод оцінки завадової обстановки на основі моделі Окумура-Хата для визначення зон безпечного прольоту безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. 7 (48). С. 1871–1884.
8. Підвищення захищеності радіоліній спеціального зв'язку БПЛА / І. В. Панченко та ін. *Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2025. Вип. 7. С. 110–121.
9. Комплексне рішення для завадозахищеної радіолінії передачі даних і управління безпілотним літальним пристроєм / Салій О., Голь В., Дівіцький А., Хахлюк О. *Information Technology and Security*. 2023. Vol. 11., Iss. 2 (21). Pp. 251–264.
10. Манько А. В. Метод адаптації системи радіозв'язку мобільної компоненти тактичної ланки управління Національної гвардії України до умов впливу навмисних завад. *Честь і закон*. 2024. Т. 4. № 91. С. 60–67.

*Стаття надійшла до редакції 12.10.2025 р.*

UDC 621.396.677:629.735.05

**К. Sporyshev, B. Ivanov**

### **METHOD OF SPATIAL-ENERGY OPTIMIZATION OF RADIO CHANNELS FOR CONTROL OF UNMANNED AIRCRAFT**

*The article considers the problem of increasing the noise immunity of radio channels for controlling unmanned aerial vehicles in the conditions of a complex and dynamic radio-electronic environment typical of modern military and special operations. It is shown that traditional approaches to building radio channels for controlling UAVs, which are based on the use of fixed antenna patterns and transmitter power reservation, do not provide the proper level of communication reliability in the presence of active and passive sources of radio interference.*

*The aim of the research is to develop a method for spatial and energy optimization of radio channels for controlling unmanned aerial vehicles, which is based on the joint selection of the parameters of the beam pattern of the on-board antenna system and the modes of energy control of the transmitter, taking into account the spatial location of ground control points, sources of interference and the flight path of the UAV. The paper proposes a formalized mathematical description of the radio control line, which allows estimating the instantaneous signal/interference+noise ratio along the flight path. The method is based on the adaptive formation of the beam pattern of the on-board antenna with maximization of the gain in the direction of the ground control point and minimization of radiation levels in the directions of radio interference sources, as well as on the optimal distribution of transmitter power taking into account energy constraints. A model of automated tracking of the location of the ground control point by the UAV on-board antenna system is proposed, which ensures the minimization of the angular error of the main lobe of the directional diagram during the entire flight. It is shown that the integration of spatial and energy optimization allows to increase the interference immunity of the control radio channel without a significant increase in energy consumption, which is critically important for long and complex UAV missions.*

*Key words: unmanned aerial vehicles, interference environment, control radio channels, antenna devices, electronic warfare, signal processing, navigation.*

**Спорішев Костянтин Олександрович** – доктор наук з державного управління, доцент, заступник начальника інституту підготовки керівних кадрів з наукової роботи Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-4737-9698>

**Іванов Богдан Вадимович** – начальник науково-дослідного відділу озброєння та військової техніки науково-дослідного управління морських безпілотних ударних систем Науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія».

<https://orcid.org/0000-0001-5955-5930>