

М. В. Бугайов

ОПТИМІЗАЦІЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ПІД ЧАС ВЕДЕННЯ РАДІОМОНІТОРИНГУ

На сьогодні малорозмірні безпілотні літальні апарати все частіше використовують для ведення радіомоніторингу. Їх переміщення відносно джерела радіовипромінювання призводить до мінливості рівня прийнятого сигналу. Це пов'язано з дрібномасштабними завмираннями сигналу, які проявляються під час такого переміщення лише на половину довжини хвилі несучої частоти радіосигналу. Для зменшення впливу цього фактора на роботу алгоритмів, які використовують амплітудні методи пеленгування і через свою простоту часто застосовуються на безпілотних літальних апаратах, необхідно оптимізувати швидкість їх польоту. Метою статті є розроблення математичного апарату для розрахунку оптимальної швидкості польоту безпілотного літального апарата під час панорамного радіомоніторингу в умовах дрібномасштабних завмирань.

У ході досліджень як критерій оптимізації визначено максимізацію площі огляду засобу радіомоніторингу, що залежить від дальності виявлення джерел радіовипромінювання та швидкості польоту безпілотного літального апарата. Встановлено залежність між швидкістю його польоту та тривалістю вибірки сигналу для зменшення впливу завмирань на помилки оцінювання рівня прийнятого сигналу. Отримано аналітичний вираз, що пов'язує площу огляду безпілотного літального апарата зі швидкістю його польоту та частотою радіосигналу, описаного монотонною зростаючою функцією від швидкості польоту. Встановлено, що для виявлення максимальної кількості джерел радіовипромінювання безпілотний літальний апарат повинен рухатися з максимальною можливою швидкістю. При цьому тривалість вибірки сигналу розраховуємо для цієї швидкості та максимальної частоти сигналу. Запропоноване рішення дозволить за заданий час польоту безпілотного літального апарата виявляти максимальну кількість джерел радіовипромінювання.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; радіомоніторинг; радіочастотний спектр; швидкість польоту; інтервал аналізу.

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сучасному етапі розвитку радіоелектронних систем малорозмірні безпілотні літальні апарати (БпЛА) все частіше використовують для вирішення найрізноманітніших завдань, зокрема для ведення радіомоніторингу (РМ) [1–6]. Особливістю виявлення та визначення місцеположення джерел радіовипромінювання (ДРВ) за допомогою розміщеного на БпЛА засобу РМ є мінливість параметрів прийнятого сигналу, спричинена переміщенням самого апарата відносно джерела. Це явище математично описують шляхом моделювання завмирань сигналу на трасі поширення [7–11]. Швидка зміна потужності прийнятого сигналу пов'язана із дрібномасштабними завмираннями, які проявляються під час переміщення

БпЛА лише на половину довжини хвилі несучої частоти радіосигналу. У такий спосіб просторовий розподіл напруженості електричного поля переходить у часову мінливість рівня прийнятого сигналу. Для зменшення впливу цього фактора на роботу алгоритмів, які використовують амплітудні методи і через свою простоту часто застосовуються на БпЛА [5], необхідно знижувати швидкість його польоту. Проте через обмежений час польоту БпЛА для огляду максимальної площі він повинен переміщуватися якомога швидше. У такому разі необхідно скорочувати тривалість вибірки сигналу, що призведе до зменшення дальності виявлення ДРВ. Отже, вибір швидкості польоту БпЛА РМ містить суперечності й потребує розроблення підходів для розрахунку його оптимального значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки суттєво зросла кількість наукових публікацій, присвячених дослідженням ведення РМ із використанням малорозмірних дронів. У [12] описано процес обльоту БпЛА навколо відомого ДРВ та вимірювання параметрів прийнятих сигналів. Проблему аналізу радіочастотного спектра (РЧС) для покращення його використання в ході організації радіоліній БпЛА для випадку негаусових перешкод описано в [13]. Шляхи оптимізації траєкторії польоту та перерозподілу частотного ресурсу під час ведення РМ запропоновано в [14]. У [15] наведено метод аналізу РЧС у разі використання великих мереж із БпЛА. Розподілену систему збирання даних про радіоелектронну обстановку із використанням групи БпЛА та їх передачу на центральний пункт оброблення інформації запропоновано в [16]. У [17] наведено підхід до планування польоту БпЛА РМ, що включає розподіл часу на аналіз радіоелектронної обстановки та передавання даних. У [18] розглянуто процес оптимізації аналізу РЧС для групи БпЛА.

Проте в розглянутих роботах основна увага приділена розподілу часу на аналіз РЧС та передавання зібраних даних у центр оброблення інформації. Питанням же оптимізації швидкості польоту БпЛА в умовах дрібномасштабних завмирань, що є критичним в умовах ведення РМ у міських та приміських районах, увага не приділяється.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є розроблення математичного апарату для розрахунку оптимальної швидкості польоту БпЛА під час ведення панорамного РМ в умовах дрібномасштабних завмирань.

Виклад основного матеріалу. За час аналізу сигналу в смузі частот ΔF середовище (умови поширення радіохвиль) не повинно дуже змінитися щодо дрібномасштабних завмирань, щоб не вносилися спотворення у вимірне значення потужності прийнятого сигналу. У такому разі БпЛА, що рухається зі швидкістю v , повинен переміститися на відстань, значно меншу половини довжини хвилі. Саме на цій відстані проявляються глибокі дрібномасштабні завмирання [9]. За такого підходу час аналізу (тривалість вибірки сигналу) T_a можна розрахувати відповідно до виразу [19]:

$$T_a \ll \frac{\lambda}{2v} \approx \frac{c}{20vf_0}, \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі;

c – швидкість поширення радіохвиль;

f_0 – несуча частота радіосигналу.

На рис. 1 наведено залежність часу аналізу від швидкості польоту БпЛА для деяких значень несучої частоти сигналу (відповідно до виразу (1)). Якщо швидкість апарата може змінюватися в межах від 10 км/год до 200 км/год (2,8–55,5 м/с), то в разі сканування смуги частот у діапазоні від 300 МГц до 6 ГГц (нижня межа обрана з урахуванням прийнятних розмірів антен) мінімальний час аналізу не повинен перевищувати 45 мкс, а максимальний – 18 мс.

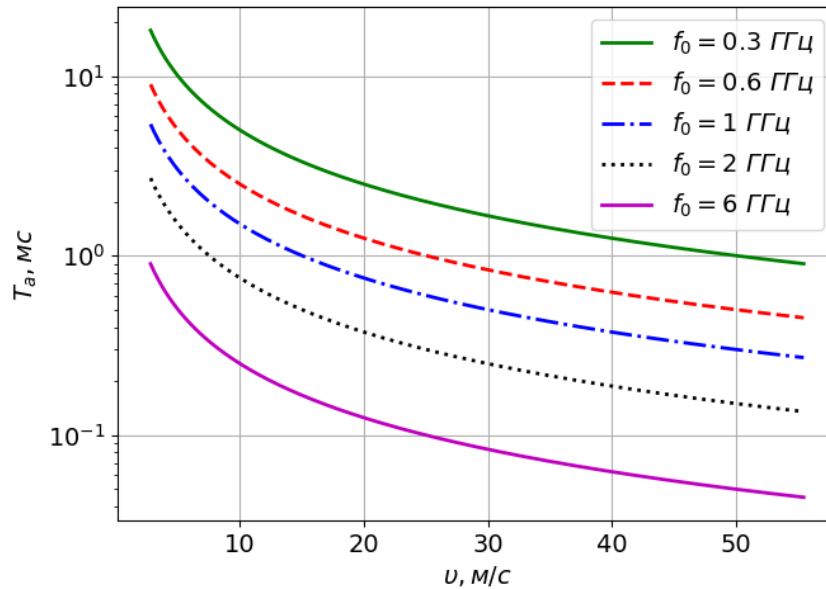


Рис. 1. Залежність часу аналізу від швидкості польоту БпЛА для деяких значень частоти радіосигналу

Якщо тривалість польоту БпЛА T_F не залежить від його швидкості, то велика швидкість польоту вимагатиме малих значень T_a . Це, у свою чергу, призведе до зниження значення відношення сигнал-шум (ВСШ) і зменшення дальності виявлення ДРВ R . Проте за фіксованої тривалості польоту та максимальної швидкості БпЛА пролетить максимальний шлях. За малої швидкості польоту час аналізу T_a буде більшим (відповідно до виразу (1)), що зумовить зростання ВСШ і дальності виявлення ДРВ. Однак шлях польоту БпЛА зменшуватиметься, тому його швидкість v є параметром, значення якого підлягає оптимізації.

Значення v будемо шукати за критерієм максимальної кількості ДРВ, які потенційно можуть бути виявлені засобом РМ. Оскільки їх кількість та розміщення апріорно невідомі, то оптимальне значення v повинне забезпечити максимальну площу огляду для заданої дальності виявлення R та фіксованого часу польоту БпЛА T_F (рис. 2). Значення цієї площі в припущенні, що висота польоту БпЛА h набагато менша дальності виявлення типового ДРВ R , наближено можна розрахувати за таким виразом:

$$S \approx 2RvT_F. \quad (2)$$

Цей вираз не містить значення частоти радіосигналу, оскільки дальність виявлення відображає лише енергетичну доступність ДРВ.

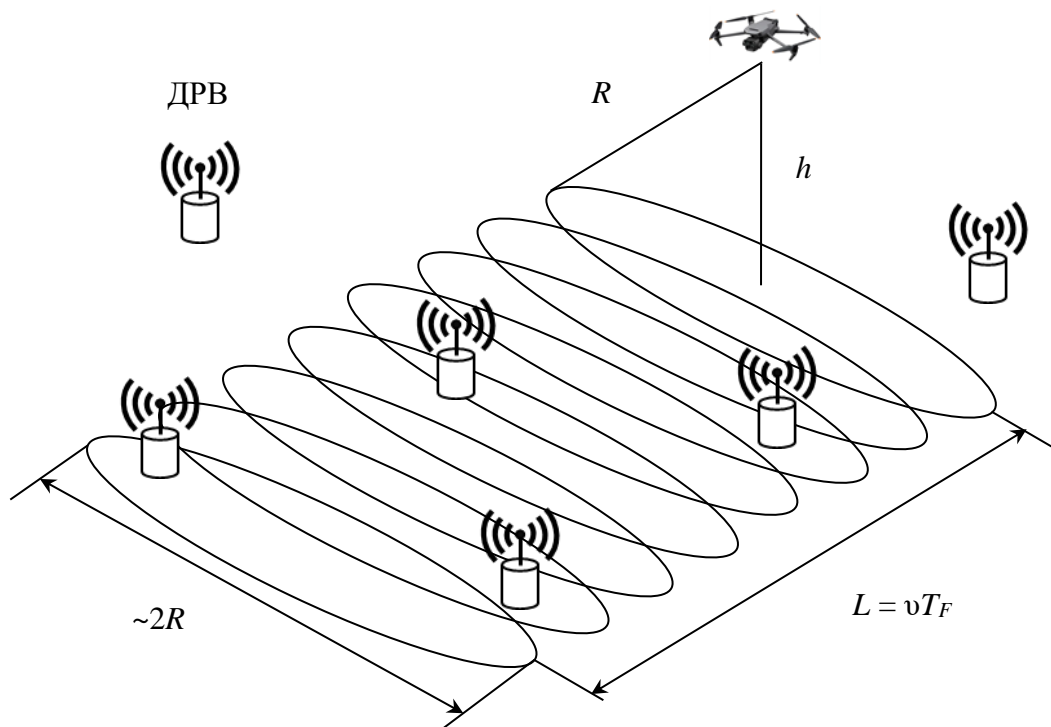


Рис. 2. Зона пошуку ДРВ

Дальність виявлення ДРВ R у разі заданих показників якості виявлення: ймовірності правильного виявлення P_D та ймовірності хибної тривоги P_F – є функцією від ВСШ q . Значення ВСШ також є функцією від часу аналізу (накопичення) сигналу T_a , що визначається швидкістю польоту БПЛА для заданої частоти радіосигналу (1). Тому дальність виявлення ДРВ у загальному випадку є функцією від швидкості БПЛА $R(v)$, яка залежить від обраного алгоритму виявлення.

Показники якості виявлення пов'язані зі значенням ВСШ, яке, у свою чергу, визначається як відношення потужності прийнятого сигналу P_r до потужності шуму в приймачеві P_n :

$$q = \frac{P_r}{P_n}. \quad (3)$$

Потужність прийнятого сигналу можна розрахувати, знаючи потужність випромінювання P_t ДРВ та дальність до засобу РМ на БПЛА, відповідно до такого виразу:

$$P_r = A_{ef} \frac{G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi R^2}, \quad (4)$$

де A_{ef} – ефективна площа антени засобу РМ,

$G(\theta, \gamma)$ – діаграма спрямованості антени для заданого азимута θ та кута місця γ .

Тоді ВСШ можна записати в такому вигляді:

$$q = A_{ef} \frac{G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi R^2 P_n}. \quad (5)$$

Визначимо із цього рівняння дальність виявлення R :

$$R = \sqrt{A_{ef} \frac{G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi P_n q}}. \quad (6)$$

В умовах апріорної невизначеності щодо структури сигналу ДРВ доцільно використати енергетичний детектор. Якщо розглядати типовий випадок виявлення випадкового нормально розподіленого сигналу на фоні білого гаусівського шуму, то для великих значень довжини вибірки N (більше 30) залежність між необхідною кількістю відліків і значенням ВСШ можна описати за допомогою такого рівняння [20–21]:

$$N = 2 \left(\frac{Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)(q+1)}{q} \right)^2, \quad (7)$$

де $Q(x)$ – компонента кумулятивної функції стандартного нормального розподілу $\Phi(x)$ – $Q(x) = 1 - \Phi(x)$.

Знайдемо з рівняння (7) значення ВСШ з урахуванням того, що об'єм вибірки N для заданої частоти дискретизації F_s становить $N = T_a F_s$:

$$q = \frac{Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D)}{\sqrt{\frac{T_a F_s}{2}} + Q^{-1}(P_D)}. \quad (8)$$

Після підстановки виразу (8) у рівняння (6) отримаємо

$$R = \sqrt{\frac{A_{ef} G(\theta, \gamma) P_t \left(\sqrt{\frac{T_a F_s}{2}} + Q^{-1}(P_D) \right)}{4\pi P_n \left(Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D) \right)}}. \quad (9)$$

Введемо таке позначення:

$$k = \sqrt{\frac{A_{ef} G(\theta, \gamma) P_t}{4\pi P_n \left(Q^{-1}(P_F) - Q^{-1}(P_D) \right)}}. \quad (10)$$

Тоді вираз (9) можна записати у такому вигляді:

$$R = k \sqrt{\sqrt{\frac{T_a F_s}{2}} + Q^{-1}(P_D)}. \quad (11)$$

Знехтуємо другим доданком у підкореневому виразі, оскільки він значно менший, ніж перший. Після цього рівняння (11) можна записати у такій формі:

$$R \approx k \left(\frac{T_a F_s}{2} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (12)$$

Підставляючи у цей вираз T_a з рівняння (1), отримаємо

$$R = k \left(\frac{c F_s}{20 v f_0} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (13)$$

Залежність дальності виявлення від частоти дискретизації F_s сигналу в цьому виразі зумовлена тим, що в разі її збільшення зростає кількість відліків для заданого часу аналізу. Проте для програмно визначеного приймача частота дискретизації наближено дорівнює смузі пропускання, збільшення якої призводить до зниження його чутливості (зростання потужності шуму P_n у (9)) та зменшення дальності виявлення, тому в загальному випадку дальність виявлення не залежить від частоти дискретизації сигналу.

Як бачимо, дальність виявлення є монотонною спадною функцією від швидкості польоту БПЛА. Аналогічно, у разі фіксованої швидкості БПЛА, дальність польоту є монотонною зростаючою функцією від швидкості. Після підстановки виразу (13) у рівняння (2) отримаємо залежність площі огляду від швидкості польоту БПЛА:

$$S = 2k \left(\frac{c F_s}{20 f_0} \right)^{\frac{1}{4}} v^{\frac{3}{4}} T_F. \quad (14)$$

Значення цього виразу є монотонною зростаючою функцією від швидкості, тому із рівняння (14) випливає, що для огляду максимальної площі БПЛА повинен рухатися з максимальною швидкістю. Залежність від частоти сигналу в цьому виразі відображає той факт, що зі збільшенням частоти зростає просторова мінливість розподілу електромагнітного поля, спричинена дрібномасштабними завмираннями. Це призводить до зменшення часу аналізу сигналу T_a , що знижує ВСШ та дальність виявлення.

На рис. 3 наведено форму залежності площі огляду від значень швидкості польоту БПЛА та частоти радіосигналу для тривалості польоту 1 год. Як бачимо, максимальна площа огляду досягається за мінімальної частоти радіосигналу та максимальної швидкості польоту. У ході ведення РМ за допомогою БПЛА аналіз РЧС проводиться шляхом сканування, тобто в кожній точці (локальній області) простору відбувається

переналаштування радіоприймального пристрою на нову частоту з кроком, що дорівнює смузі його пропускання, причому цей перехід повинен відбуватися протягом кількох мікросекунд. Очевидно, що змінювати швидкість польоту БПЛА в таких умовах для забезпечення виконання умови (1) практично неможливо, тому доцільно обрати час аналізу кожної частоти, що відповідає максимальному значенню частоти приймача. А БПЛА в цьому разі повинен переміщуватися з максимально можливою швидкістю. У таких умовах час на сканування всієї смуги частот становитиме

$$T_{\Delta\Pi} = \frac{(f_{\max} - f_{\min})c}{20F_s v_{\max} f_{\max}}, \quad (15)$$

де f_{\min} та f_{\max} – мінімальна та максимальна робочі частоти приймача;
 v_{\max} – максимальна швидкість польоту БПЛА.

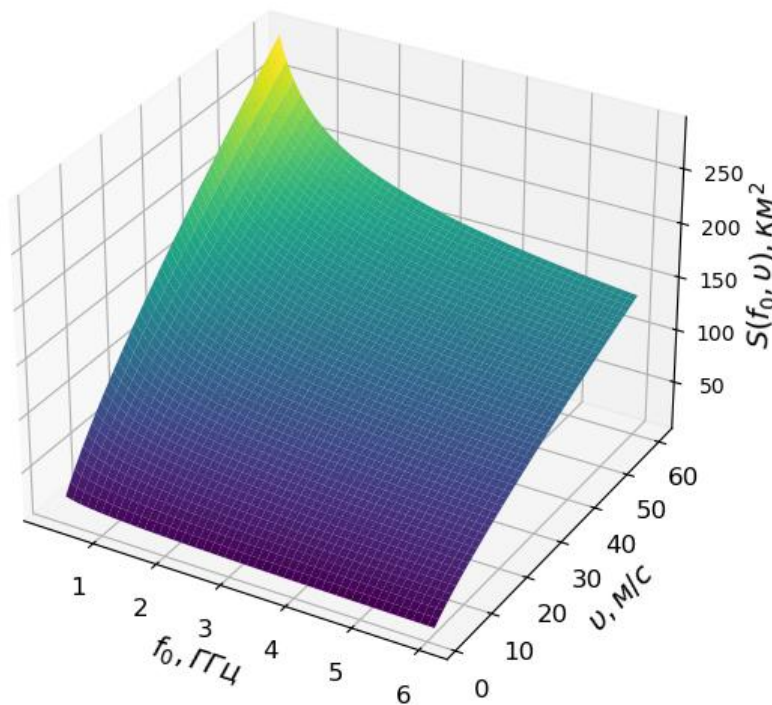


Рис. 3. Залежність площі огляду від швидкості польоту БПЛА та частоти радіосигналу

Для частоти дискретизації сигналу 20 МГц мінімальна кількість відліків, що підлягають аналізу (для тривалості інтервалу аналізу 45 мкс), становитиме 900, а максимальна кількість відліків (для тривалості інтервалу аналізу 18 мс) – 360000. Для ймовірності правильного виявлення 0,9 та ймовірності хибної тривоги 0,001 виявлення сигналу енергетичним детектором для заданих об'ємів вибірки сигналу можливе в разі значень ВСШ -20 дБ та -33 дБ відповідно, за умови, що ширина спектра сигналу дорівнює смузі пропускання приймача. Якщо сигнал має вузький спектр, то його можна виявити з такими ж показниками якості за вищих значень ВСШ, що еквівалентно зменшенню дальності виявлення.

Для швидкості польоту БПЛА 200 км/год за використання радіоприймального пристрою з верхньою частотою 6 ГГц виявлення сигналу можливе в разі ВСШ -20 дБ і вище в смузі, що дорівнює ширині спектра сигналу.

Висновки. У ході проведених досліджень розроблено підхід до розрахунку оптимальної швидкості польоту БПЛА та тривалості вибірки сигналу під час ведення РМ в умовах дрібномасштабних завмирань. Запропоноване рішення дозволить за заданий час польоту виявляти максимальну кількість ДРВ. Розроблений математичний апарат може бути реалізований під час розроблення сучасних систем РМ для БПЛА. Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку полягають у побудові математичної моделі прийнятого сигналу та відповідних методів їх оброблення у разі ведення РМ заданої ділянки місцевості із використанням кількох БПЛА. Це дасть змогу реалізувати рознесене приймання радіосигналів і зменшити негативний вплив завмирань.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Chen F., Rezatofighi S. H., Ranasinghe D. C. GyroCopter: Differential Bearing Measuring Trajectory Planner for Tracking and Localizing Radio Frequency Sources // Computer Science. Robotics. 2024. 9 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13081>
2. Dressel L., Kochenderfer M. J. Pseudo-bearing Measurements for Improved Localization of Radio Sources with Multirotor UAVs // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, QLD, Australia, 2018. P. 6560–6565. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460734>
3. Non-myopic Sensor Path Planning for Emitter Localization with a UAV / Hoffmann F., Schily H., Krestel M. et al. // 26th International Conference on Information Fusion. 2023. 8 p. <https://doi.org/10.23919/FUSION52260.2023.10224174>
4. Dressel L., Kochenderfer M. J. Hunting Drones with Other Drones: Tracking a Moving Radio Target // International Conference on Robotics and Automation. Montreal, QC, Canada, 2019. P. 1905–1912. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794243>
5. UAV-born Narrowband Radar Complex for Direction Finding of Radio Sources / S. Zhyla, A. Popov, E. Tserne et al. // 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies. Athens, Greece, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416434>
6. Kwon H., Guvenc I. RF Signal Source Search and Localization Using an Autonomous UAV with Predefined Waypoints / Zhyla S., Popov A., Tserne E. et al. // IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Florence, Italy, 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200783>
7. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. (2nd ed.). Prentice Hall, 2003. 953 p.
8. Recommendation ITU-R P.1406-2 (07/2015) Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands P Series Radiowave Propagation. 13 p.
9. Goldsmith A. Wireless communications. (2nd ed.). Stanford University, 2020. 597 p.
10. Lu S., May J., Haines R. Efficient Modeling of Correlated Shadow Fading in Dense Wireless Multi-hop Networks // In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2014. P. 311–316. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6951986>

11. Karagiannis G. A., Panagopoulos A. D. Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems // *Future Internet*, MDPI. 2019. Vol. 11 (5). P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/fi11050106>
12. Liu X., Guan M., Zhang X., Ding H. Spectrum Sensing Optimization in an UAV-Based Cognitive Radio // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 44002–44009. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862424>
13. Zhang J. et al. Spectrum and Energy Efficient Multi-antenna Spectrum Sensing for Green UAV Communication // *Digital Communications and Networks*. 2023. Vol. 9, Iss. 4. P. 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.09.017>
14. Yan L., Cai Y., Wei H. Unmanned Aerial Vehicle-assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC // *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2024. Iss. 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>
15. Wang W., Peng J. Cooperative Spectrum Sensing Algorithm for UAV Based on Deep Learning // *IEEE 96th Vehicular Technology Conference*. London, United Kingdom, 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10013034>
16. Tekbiyik K., Kurt G. K., Lesage-Landry A. Federated Learning for UAV-Based Spectrum Sensing: Enhancing Accuracy Through SNR-Weighted Model Aggregation // *Computer Science*. 2024. 6 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.11159>
17. Gul N., Kim S. M., Ali J., Kim J. UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks // *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18 (9). 36 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>
18. Wu J. et al. Optimisation of Virtual Cooperative Spectrum Sensing for UAV-based Interweave Cognitive Radio System // *IET Commun.* 2021. Vol. 15. P. 1368–1379. <https://doi.org/10.1049/cmu2.1210>
19. Бугайов М. В. Математична модель прийнятого сигналу панорамним засобом радіомоніторингу на безпілотному літальному апараті // *Всеукр. міжвідомчий наук.-техн. збірник “Радіотехніка”*. Харків : ХНУРЕ, 2024. № 219. С. 82–91. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09>
20. Kay S. M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection theory*, Vol. 2. Prentice Hall, New Jersey, 1998. 576 p.
21. Zhang W. *Handbook of Cognitive Radio* // Springer. 2019. 2034 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1394-2>

Стаття надійшла до редакції 03.02.2025.

REFERENCES

1. Chen, F., Rezatofghi, S. H., & Ranasinghe, D. C. (2024). GyroCopter: Differential Bearing Measuring Trajectory Planner for Tracking and Localizing Radio Frequency Sources. *Computer Science. Robotics*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13081>
2. Dressel, L., & Kochenderfer, M. J. (2018). Pseudo-bearing Measurements for Improved Localization of Radio Sources with Multirotor UAVs. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, QLD, Australia, (pp. 6560–6565). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2018.8460734>

3. Hoffmann, F., Schily, H., & Krestel, M. et al. (2023). Non-myopic Sensor Path Planning for Emitter Localization with a UAV. In *26th International Conference on Information Fusion*. <https://doi.org/10.23919/FUSION52260.2023.10224174>
4. Dressel, L., Kochenderfer, M. J. (2019). Hunting Drones with Other Drones: Tracking a Moving Radio Target. In *International Conference on Robotics and Automation*. Montreal, QC, Canada. (pp. 1905–1912). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794243>
5. Zhyla, S., Popov, A., Tserne, E. et al. (2023). UAV-born Narrowband Radar Complex for Direction Finding of Radio Sources. In *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*. Athens, Greece. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416434>
6. Kwon, H., & Guvenc, I. (2023). RF Signal Source Search and Localization Using an Autonomous UAV with Predefined Waypoints. In *IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. Florence, Italy. (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200783>
7. Sklar, B. (2003). *Digital Communications. Fundamentals and Applications*. (2nd ed.). Prentice Hall.
8. *Recommendation ITU-R P.1406-2*. (07/2015). Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands P Series Radiowave Propagation.
9. Goldsmith, A. (2020). *Wireless Communications*. (2nd ed.). Stanford University.
10. Lu, S., May, J., & Haines, R. (2014). Efficient Modeling of Correlated Shadow Fading in Dense Wireless Multi-hop Networks. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. (pp. 311–316). <https://doi.org/10.1109/WCNC.2014.6951986>
11. Karagiannis, G. A., & Panagopoulos, A. D. (2019). Dynamic Lognormal Shadowing Framework for the Performance Evaluation of Next Generation Cellular Systems. *Future Internet, MDPI*, 11 (5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/fi11050106>
12. Liu, X., Guan, M., Zhang, X., & Ding, H. (2018). Spectrum Sensing Optimization in an UAV-Based Cognitive Radio. *IEEE Access.*, 6, 44002–44009. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862424>
13. Zhang, J. et al. (2023). Spectrum and Energy Efficient Multi-antenna Spectrum Sensing for Green UAV Communication. *Digital Communications and Networks*, 9, 4, 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.09.017>
14. Yan, L., Cai, Y., & Wei, H. (2024). Unmanned Aerial Vehicle-assisted Wideband Cognitive Radio Network Based on DDQN-SAC. *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 43. <https://doi.org/10.1186/s13634-024-01141-3>
15. Wang, W., & Peng, J. (2022). Cooperative Spectrum Sensing Algorithm for UAV Based on Deep Learning. In *IEEE 96th Vehicular Technology Conference*. London, United Kingdom. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10013034>
16. Tekbıyık, K., Kurt, G. K., & Lesage-Landry, A. (2024). Federated Learning for UAV-Based Spectrum Sensing: Enhancing Accuracy Through SNR-Weighted Model Aggregation. *Computer Science*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.11159>
17. Gul, N., Kim, S. M., Ali, J., & Kim, J. (2023). UAV Aided Virtual Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks. *PLoS ONE*, 18 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291077>

18. Wu, J. et al. (2021). Optimisation of Virtual Cooperative Spectrum Sensing for UAV-based Interweave Cognitive Radio System. *IET Commun*, 15, 1368–1379. <https://doi.org/10.1049/cmu2.1210>
19. Buhaiov, M. V. (2024). Matematychna model pryiniatoho syhnalu panoramnym zasobom radiomonitorynhu na bezpilotnomu litalnomu aparati [Mathematical Model of the Received Signal by Panoramic Means of Radio Monitoring on an Unmanned Aerial Vehicle]. *Vseukr. mizhvidomchyi nauk.-tekhn. zbirnyk "Radiotekhnika" [All-Ukrainian Interdepartmental Scientific and Technical Collection "Radio Engineering"]*, 219. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.4.219.09> [in Ukrainian].
20. Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection theory*. Vol. 2. Prentice Hall, New Jersey.
21. Zhang, W. (2019). *Handbook of Cognitive Radio*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1394-2>

M. V. Buhaiov

UNMANNED AERIAL VEHICLE FLIGHT SPEED OPTIMIZATION FOR SPECTRUM SENSING

Nowadays, small unmanned aerial vehicles are increasingly used for spectrum sensing. The movement of the unmanned aerial vehicle relative to the radio source leads to variability in the level of the received signal. This is due to small-scale signal fading, which occurs when the unmanned aerial vehicle moves by only half the wavelength of the radio signal carrier frequency. To reduce the influence of this factor on the characteristics of algorithms that use amplitude methods and are often used on unmanned aerial vehicles due to their simplicity, it is necessary to optimize the speed of its flight. The aim of the article is to develop a mathematical apparatus for calculating the optimal unmanned aerial vehicles flight speed for wideband spectrum sensing in conditions of small-scale fading. In the course of the research, the optimization criterion was determined to be the maximization of the scanning area, which depends on the range of detection of radio sources and the unmanned aerial vehicles flight speed. The dependence between the unmanned aerial vehicles flight speed and the duration of signal sample is established to reduce the effect of fading on errors in estimating the received signal strength.

An analytical expression has been obtained that relates the scanning area of the unmanned aerial vehicles to its flight speed and the frequency of the radio signal, which is described by a monotonous increasing function of the flight speed. It has been established that in order to detect the maximum number of radio sources, a unmanned aerial vehicle should move at maximum speed. The signal sampling duration is calculated for a given speed and maximum signal frequency. The proposed solution will allow detecting the maximum number of radio sources for a given unmanned aerial vehicle flight time. The developed mathematical apparatus can be implemented in the development of modern radio monitoring systems for unmanned aerial vehicles.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; spectrum sensing; radio frequency spectrum; flight speed; sensing interval.*