

Труды МАИ. 2025. № 142  
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

Научная статья

УДК 631.39

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185108>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IFFAFD>

## **ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ПРИЕМА И УПРАВЛЕНИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫМИ БПЛА С УЧЕТОМ ОТРАЖЕНИЙ СИГНАЛА ОТ ГОРОДСКИХ ЗАСТРОЕК**

**Эмиль Мехман оглы Ахмедов**

Национальное Аэрокосмическое Агентство,

Баку, Азербайджанская Республика

[emil.ahmadov21@gmail.com](mailto:emil.ahmadov21@gmail.com)

*Аннотация.* Исследованы вопросы оптимизации выбора местоположения центра приема и управления БПЛА с учетом отражений сигнала от близлежащих городских застроек. Успех миссии разведывательных БПЛА в целом зависит от возможности решения в ходе полета такой проблемы как затухание сигнала. Одним из наиболее важных задач, подлежащих к решению для повышения эффективности разведывательных БПЛА является учет воздействия различных ослаблений передаваемого сигнала на трассах «БПЛА-центр» или «центр-БПЛА». Ослабление сигнала в этих каналах связи проявляет себя в виде амплитудных флуктуаций во времени или по частоте. Дополнительным составляющим затухания относят ослабление из-за многопутности. Применительно к случаю полета БПЛА над городом на низкой высоте и при поддержании связи на частотах менее 5 ГГц наиболее

существенное влияние может оказать многопутность сигнала, возникающая из-за многократных отражений от различных городских строений. Многопутность заключается в поступлении в центр приема многочисленных отраженных сигналов с различными фазами, приводящих к появлению эффектов интерференции. Сформулирована и решена задача такого выбора места расположения центра управления полетом в городской среде, при котором шумы из-за многопутности были бы сведены к минимуму.

Решение задачи с применением математического аппарата безусловной вариационной оптимизации показало, что шумы многопутности можно минимизировать если отражающие строения поблизости центра будут расположены таким образом, чтобы задержки отраженного сигнала от застроек были обратно пропорциональны квадрату сигнала поступающих от этих застроек, т.е. сильно отражающие застройки должны расположены ближе к центру, чем слабо отражающие объекты.

**Ключевые слова:** многопутность, БПЛА, оптимизация, отражение сигнала, интерференция

**Для цитирования:** Ахмедов Эмиль Мехман оглы. Вопросы оптимизации расположения центра приема и управления разведывательными БПЛА с учетом отражений сигнала от городских застроек // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185108>

Original article

# OPTIMIZATION OF THE LOCATION OF THE CENTER FOR RECEIVING AND CONTROLLING RECONNAISSANCE UAVS, TAKING INTO ACCOUNT THE REFLECTIONS OF THE SIGNAL FROM URBAN AREAS

Emil Mehman oglu Akhmedov,

National Aerospace Agency,

Baku, Republic of Azerbaijan

[emil.ahmadov21@gmail.com](mailto:emil.ahmadov21@gmail.com)

*Abstract.* The issues of optimizing the choice of the location of the UAV reception and control center, taking into account the reflections of the signal from nearby urban areas, are investigated. The success of the reconnaissance UAV mission as a whole depends on the possibility of solving such a problem as signal attenuation during the flight. One of the most important tasks to be solved in order to increase the effectiveness of reconnaissance UAVs is to take into account the effects of various attenuations of the transmitted signal on the "UAV-center" or "center-UAV" routes. Signal attenuation in these communication channels manifests itself in the form of amplitude fluctuations in time or frequency. Additional components of attenuation include attenuation due to multipath. In the case of a UAV flying over a city at low altitude and when communicating at frequencies below 5 GHz, the signal multipath resulting from multiple reflections from various urban structures may have the most significant impact. Multipath consists in the arrival at the receiving center of numerous reflected signals with different phases, leading to interference effects. The problem of choosing the location of the flight control center in an urban environment in which noise due to multipath would be minimized is formulated and solved. Solving the problem using

the mathematical apparatus of unconditional variational optimization showed that multipath noise can be minimized if reflective structures near the center are located in such a way that the delays of the reflected signal from buildings are inversely proportional to the square of the signal coming from these buildings, i.e. strongly reflective buildings should be located closer to the center than weakly reflective objects.

**Keywords:** multipath, UAV, optimization, signal reflection, interference

**For citation:** Akhmedov Emil Mehman oglu. Optimization of the location of the center for receiving and controlling reconnaissance UAVS, taking into account the reflections of the signal from urban areas. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185108>

## Введение

С появлением БПЛА сфера применения этих средств неизменно расширяется и в настоящее время охватывает такие области, как дистанционное зондирование [1,2], мониторинг [3] решение различных проблем при чрезвычайных ситуациях [4,5] доставка различных грузов [6]. При этом различные функции и задачи могут быть успешно выполнены при обеспечении надежного канала связи между БПЛА и центром управления полетом этих средств [7]. Появление БПЛА, снабженных искусственным интеллектом [8,9] могут обеспечить успех поставленной задачи в пределах учтенных заранее «непредвиденных» факторов и весь «интеллектуальный» ресурс БПЛА затрачивается на идентификацию таких факторов для применения возможных мер противодействия. С учетом указанного ограничения важность и

актуальность наличия надежной коммуникации между БПЛА и центром управления полетом остается неизменным.

Успех миссии разведывательных БПЛА в целом зависит от возможности решения в ходе полета таких проблем как затенение контролируемых участков [10], правильный выбор маршрута [11], замирания сигнала [12], ограниченность энергоресурсов [13] и др. При этом затухание сигнала преобразует особое значение для разведывательной миссии.

В работе [14] проанализированы особенности ослабления электромагнитных волн, используемых в легких самолётах и БПЛА. Показано целесообразность использования миллиметрового диапазона по сравнению с ИК диапазоном при отсутствии оптической видимости.

В работе [15] для исключения влияния эффектов ослабления сигнала в авиационных системах предлагается использовать сигналы с ортогональным частотным разделением каналов, которое имеют преимущества по сравнению с классическими одночастотными сигналами.

В работе [16] рассмотрены вопросы оптимального маневрирования дронов для ухода от воздействия мощного заглушающего воздействия излучателя противодействующей стороны.

В работе [17] исследованы модель распространения радиоволн в условиях городской застройки. Показано, что в городских условиях радиосигнал затухает пропорционально четвертой степени расстояния при высоте подвеса передающей антенны не менее 3 м.

В работе [18] для создания против навигационных полей предлагается широкое использованию генераторов шумов и радиопомех.

Одним из наиболее важных задач, подлежащих к решению для повышения эффективности разведывательных БПЛА является учет воздействия различных ослаблений передаваемого сигнала на трассах «БПЛА-центр» или «центр-БПЛА». Ослабление сигнала в этих каналах связи проявляет себя в виде амплитудных флуктуаций во времени или по частоте. В общем случае можно различить широкомасштабные и маломасштабные затухания сигнала. На рис. 1 показана схема классификации затуханий сигнала [19].



Рис. 1. Схема классификации затуханий сигнала

К большемасштабным затуханиям сигнала относят потери в пути по трассе прямой видимости, а также дополнительные потери затухания из-за влияния атмосферных газов, дождя, дифракционные потери, ослабление из-за многопутности и др. Из атмосферных газов наиболее существенное влияние на частотах 1000 мГц и 5000 мГц оказывают водяные пары и кислород [14]. Что касается ослабления сигнала из-за осадков (дождя) то здесь степень затухания сигнала зависит как от частоты, так

и интенсивности дождя. Так, например, если при интенсивности дождя  $R = 1,25$  мм/час затухание ( $\gamma$ ) на частотах 1 ГГц и 5 ГГц равны  $4,51 \cdot 10^{-5}$  и  $1,4 \cdot 10^{-3}$  соответственно, то при интенсивности  $R = 150$  мм/час показатели затухания достигают  $3,3 \cdot 10^{-3}$  и  $0,45$  соответственно.

Дополнительным составляющим затухания относят ослабление из-за многопутности, расширения луча и сцинтилляцию [19]. Применительно к случаю полета БПЛА над городом на низкой высоте и при поддержании связи на частотах менее 5 ГГц наиболее существенное влияние может оказать многопутность сигнала, возникающая из-за многократных отражений из различных городских строений. Многопутность заключается в поступлении в центр приема многочисленных отраженных сигналов с различными фазами, приводящих к появлению эффектов интерференции. Эффект многопутности приводит к поступлению сигналов с различными величинами задержки и средней мощности, что иллюстрируется на рис. 2.

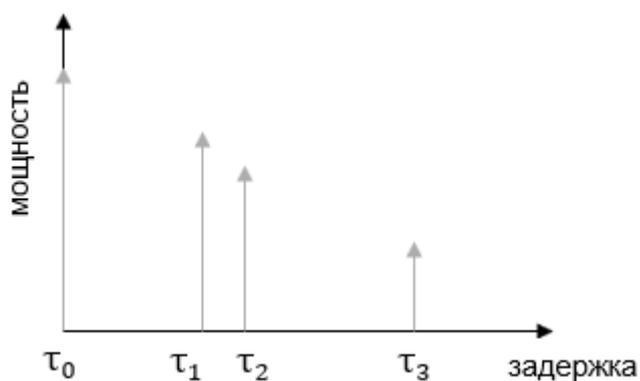


Рис. 2. Схематическое представление средней мощности и задержки сигналов, поступающих в центр управления БПЛА из-за эффекта многопутности в городской среде

Как показано, в работе [14], средняя избыточная задержка  $\bar{\tau}$  по ступающим из-за многопутности сигналов может быть определена, как

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (1)$$

где  $a_k$ -амплитуда  $k$ -го сигнала,  $P(\tau_k)$ -мощность того же сигнала.

При этом среднеквадратическое отклонение  $\sigma_t$  указанных задержек определяется как

$$\sigma_t = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \quad (2)$$

где  $\overline{\tau^2}$  определяется в качестве второго момента

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 \tau_k^2}{\sum_k a_k^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (3)$$

Как видно из выражений (2) и (3) уменьшение  $\sigma_{t_2}$  может быть достигнута путем увеличения  $\bar{\tau}^2$ , или путем уменьшения  $\overline{\tau^2}$ , где  $\overline{\tau^2}$  является вторым моментом. Таким образом, актуализируется задача выяснения условий, при которых  $\overline{\tau^2}$  достигает минимума.

## Материалы и методы

Рассмотрим типичное расположение городских построек, которые обычно устроены в виде отдельных групп застроек. Логически можно выделить такие место расположения центра управления полетом БПЛА, где показатели  $\tau_k$  и  $a_k$  находятся в трех видах взаимосвязи (рис. 3).

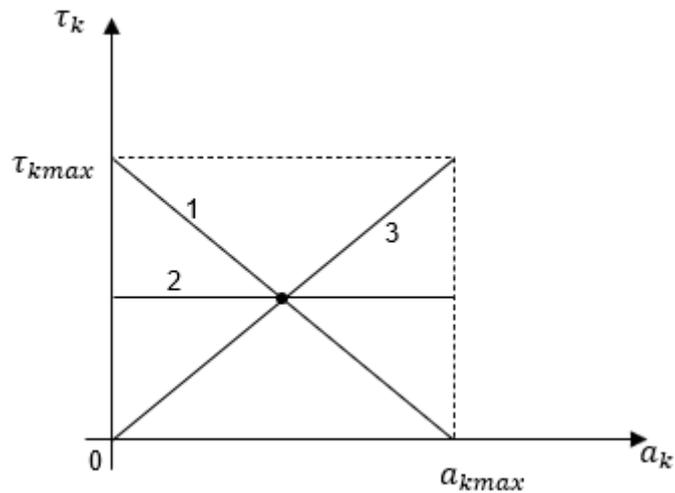


Рис. 3. Геометрическое представление взаимосвязи параметров  $\tau_k$  и  $a_k$

Сценарии взаимосвязи  $\tau_k$  и  $a_k$ , показанные на рис. 3, могут быть интерпретированы следующим образом: линия 1 (рис. 3) соответствует условию где с удалением от центра приема расположены строения нижней этажности в окружении этого центра (рис. 4 а). Линия 2 (рис. 3) соответствует случаю, когда разновысотные здания находятся на одинаковой дальности от центра по его окружности (рис. 4 б). Линия 3 (рис. 2) соответствует случаю, когда большие отражающие объекты находятся на максимальном удалении от центра, а мелкие строения находятся на максимальной близости.

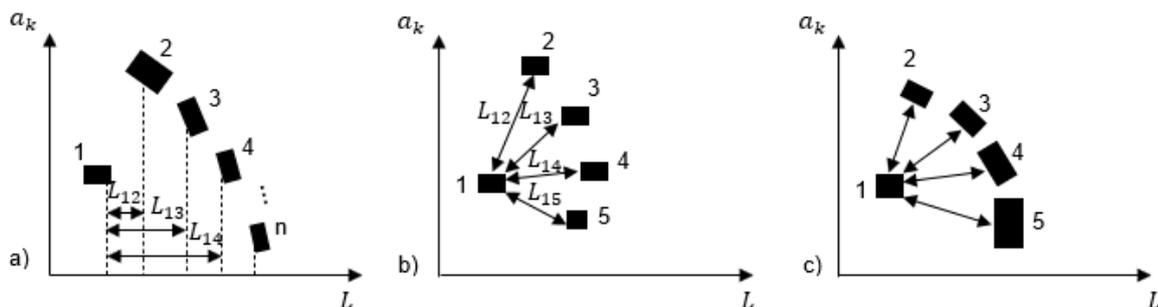


Рис. 4. Взаиморасположение центра приема и управления и отражателей.

Вариант а соответствует линии 1; б-линии 2; с-линии 3

Решаемая задача заключается в таком выборе варианта расположения центра управления БПЛА, при котором  $\overline{\tau^2}$  достиг бы минимальной величины.

Покажем математическое решение данной задачи. Введем на рассмотрение оптимизируемую функцию связи

$$\tau_k = f(a_k) \quad (4)$$

В этом случае выражение (3) принимает следующий вид

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k a_k^2 f(a_k)^2}{\sum_k a_k^2} \quad (5)$$

Допускаем, что показанные на рис. 4 варианты расположения центра и отражателей соответствует условию

$$\sum_k f(a_k) = C; C = const \quad (6)$$

Для дальнейшего удобства решения задачи оптимального размещения центра дискретный модель (5) заменим на аналоговую модель

$$\overline{\tau^2} = \frac{\int_{a_{min}}^{a_{max}} a^2 f(a)^2 da}{\int_{a_{min}}^{a_{max}} a^2 da} \quad (7)$$

Дискретное условие (7) в непрерывном случае выразим как

$$\int_{a_{min}}^{a_{max}} f(a) da = C \quad (8)$$

С учетом выражений (7) и (8), приняв дополнительное условие

$$\int_{a_{min}}^{a_{max}} a^2 da = C_1 \quad (9)$$

составим целевой функционал  $F_0$  безусловной вариационной оптимизации:

$$F = \frac{1}{C_1} \int_{a_{min}}^{a_{max}} a^2 f(a)^2 da + \lambda \int_{a_{min}}^{a_{max}} f(a) da - C \quad (10)$$

Согласно [15], решение задачи (9) удовлетворяет условию

$$\frac{d\left\{\frac{a^2 f(a)^2}{c_1} + \lambda f(a)\right\}}{df(a)} = 0 \quad (11)$$

Из условия (11) получаем:

$$\frac{2a^2 f(a)}{c_1} + \lambda = 0 \quad (12)$$

Из условия (12) находим

$$f(a) = -\frac{\lambda c_1}{2a^2} \quad (13)$$

С учетом выражений (7) и (13) находим

$$-\int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{\lambda c_1}{2a^2} = C \quad (14)$$

Из условия (14) находим

$$\lambda = -\frac{\frac{2C}{c_1}}{\int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{1}{a^2} da} = -\frac{\frac{2C}{c_1}}{\left(\frac{1}{a_{min}} - \frac{1}{a_{max}}\right)} = -\frac{2C(a_{min} a_{max})}{c_1(a_{max} - a_{min})} \quad (15)$$

С учетом выражений (13) и (15) находим

$$f(a) = \frac{2C(a_{min} a_{max})}{(a_{max} - a_{min})2a^2} \quad (16)$$

Проверка по признаку Лагранжа показывает, что при решении (16) функционал  $F$  достигает минимума, т.к. производная (11) по искомой функции всегда оказывается положительной величиной.

### Обсуждение

В результате проведенного исследования сформулирована и решена задача оптимального построения канала связи между разведывательным БПЛА и центром управления полетом в городской среде. Отмечено, что при полета БПЛА над городскими кварталами на небольшой высоте и при наличии вокруг или поблизости центра приема и управления полетом отражательных застроек различных размеров,

расположенных на разных дистанциях от центра погрешность или шумы в канале из-за многопутности поступления сигналов в центр можно оптимизировать в сторону достижения минимума.

Решение задачи с применением математического аппарата безусловной вариационной оптимизации показало, что шумы многопутности можно минимизировать если отражающие строения поблизости центра будут расположены таким образом, чтобы задержки сигнала  $t$  застроек были обратно пропорциональны квадрату сигнала поступающих от этих застроек, т.е. сильно отражающие застройки должны расположены ближе к центру, чем слабо отражающие объекты.

### **Заключение и основные выводы**

Сформулирована и решена задача такого выбора места расположения центра управления полетом в городской зоне, при котором шумы из-за многопутности были бы сведены к минимуму.

Математическое решение задачи с применением вариационного метода показало, что указанные шумы могут быть сведены к минимуму если сильно отражающие застройки расположены ближе к центру, чем слабо отражающие объекты.

### **Список источников**

1. Horcher A., Visser R.J.M. Unmanned aerial vehicles: applications for natural resource management and monitoring // Council on Forest Engineering Annual Meeting, Hot Springs (AR), USA, 2004.

2. Sugiura R., Noguchi N., Ishii K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter // *Biosystems Engineering*. 2005. V. 90 (4), P. 369-379. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2004.12.011](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.12.011)
3. Egbert J., Beard R.W. Road following control constraints for low altitude miniature air vehicles // *American Control Conference*, New York, 2007. P. 353-358.
4. Albrigtsen A. The application of unmanned aerial vehicles for snow avalanche search and rescue. Faculty of Science and Technology, Department of Engineering and Safety. The Arctic University of Norway. 2016.
5. Andriluka M., Schnitzspan P., Meyer J., Kohlbrecher S., Petersen K., von Stryk O., Roth S., Schiele B. Vision based victim detection from unmanned aerial vehicles // In *Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2010. P. 1740–1747. DOI: [10.1109/IROS.2010.5649223](https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649223)
6. Bernard M., Kondak K. Generic slung load transportation system using small size helicopters // *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009. P. 3258– 3264. DOI: [10.1109/ROBOT.2009.5152382](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152382)
7. R. Raz, A. Rosen, T. Ronen. Active aerodynamic stabilization of a helicopter/sling-load system // *Journal of Aircraft*. 1989. V. 26, P. 822-828. DOI: [10.2514/3.45847](https://doi.org/10.2514/3.45847)
8. Kusyk J., Uyar M.U., Ma K., Plishka J., Bertoli G., Boksiner J. AI and game theory based autonomous uav swarm for cybersecurity // In *Proceedings of the MILCOM 2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, Norfolk, VA, USA, 12–14 November 2019. P. 1–6. DOI: [10.1109/MILCOM47813.2019.9020811](https://doi.org/10.1109/MILCOM47813.2019.9020811)
9. Lim W.Y.B., Garg S., Xiong Z., Zhang Y., Niyato D., Leung C., Miao C. UAV-Assisted Communication Efficient Federated Learning in the Era of the Artificial

Intelligence of Things // IEEE Network. 2021. V. 35, P. 188–195. DOI: [10.1109/MNET.002.2000334](https://doi.org/10.1109/MNET.002.2000334)

10. Semsch E., Jakob M., Pavlicek D., Pechoucek M. Occlusion-aware multi-UAV surveillance // 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010), Toronto, Canada, May 10-14 2010. V. 1-3. DOI: [10.1145/1838206.1838405](https://doi.org/10.1145/1838206.1838405)

11. New America. Drones and aerial observat <http://drones.newamerica.org/primer/ion>: new technologies for property rights, human rights and global development. A primer. URL: <http://drones.newamerica.org/primer/>

12. Yan C., Fu L., Zhang J., Wang J. A comprehensive survey on UAV communication channel modeling // IEEE Access. 2019.V. 4. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2933173](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933173)

13. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage // IEEE Communications Letters, 2016. V. 20, No. 8. P. 1647–1650. DOI: [10.1109/LCOMM.2016.2578312](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312)

14. Буй Чи Тхань, Марин Д.В., Расторгуев В.В. Сравнение ослабления электромагнитных волн миллиметрового и инфракрасного диапазонов в гидрометеорах и пыли // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63128>

15. Буренко Е.А. Обоснование эффективности использования сигналов с ортогональным частотным разделением каналов в авиационных радиосистемах передачи информации // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)

16. Алиева А.Д., Гусейнова М.В. и др. Вопросы ослабления междронного электромагнитного воздействия противоборствующих сторон // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177667>
17. Тихомиров А.В., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю., Михайлов В.Ю. Прогнозирование параметров распространения радиоволн условиях городской застройки при использовании низко расположенных антенн // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87308>
18. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62310>
19. Kakar J.A. UAV communications spectral requirements, MAV and SUAV channel modelling, OFDM waveform parameters, performance and spectrum management. URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/a4ec2d22-7a08-40e1-91e9-efbbee7c10f4/content>
20. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1974. – 432 с.

## References

1. Horcher A., Visser R.J.M. Unmanned aerial vehicles: applications for natural resource management and monitoring. *Council on Forest Engineering Annual Meeting*, Hot Springs (AR), USA, 2004.

2. Sugiura R., Noguchi N., Ishii K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems Engineering*. 2005. V. 90 (4), P. 369-379. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2004.12.011](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.12.011)
3. Egbert J., Beard R.W. Road following control constraints for low altitude miniature air vehicles. *American Control Conference*, New York, 2007. P. 353-358.
4. Albrigtsen A. *The application of unmanned aerial vehicles for snow avalanche search and rescue*. Faculty of Science and Technology, Department of Engineering and Safety. The Arctic University of Norway. 2016.
5. Andriluka M., Schnitzspan P., Meyer J., Kohlbrecher S., Petersen K., von Stryk O., Roth S., Schiele B. Vision based victim detection from unmanned aerial vehicles. *In Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2010. P. 1740–1747. DOI: [10.1109/IROS.2010.5649223](https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5649223)
6. Bernard M., Kondak K. Generic slung load transportation system using small size helicopters. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009. P. 3258– 3264. DOI: [10.1109/ROBOT.2009.5152382](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152382)
7. R. Raz, A. Rosen, T. Ronen. Active aerodynamic stabilization of a helicopter/sling-load system. *Journal of Aircraft*. 1989. V. 26, P. 822-828. DOI: [10.2514/3.45847](https://doi.org/10.2514/3.45847)
8. Kusyk J., Uyar M.U., Ma K., Plishka J., Bertoli G., Boksiner J. AI and game theory based autonomous uav swarm for cybersecurity. *In Proceedings of the MILCOM 2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, Norfolk, VA, USA, 12–14 November 2019. P. 1–6. DOI: [10.1109/MILCOM47813.2019.9020811](https://doi.org/10.1109/MILCOM47813.2019.9020811)
9. Lim W.Y.B., Garg S., Xiong Z., Zhang Y., Niyato D., Leung C., Miao C. UAV-Assisted Communication Efficient Federated Learning in the Era of the Artificial

Intelligence of Things. *IEEE Network*. 2021. V. 35, P. 188–195. DOI: [10.1109/MNET.002.2000334](https://doi.org/10.1109/MNET.002.2000334)

10. Semsch E., Jakob M., Pavlicek D., Pechoucek M. Occlusion-aware multi-UAV surveillance. *9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, Toronto, Canada, May 10-14 2010. V. 1-3. DOI: [10.1145/1838206.1838405](https://doi.org/10.1145/1838206.1838405)

11. New America. *Drones and aerial observat* <http://drones.newamerica.org/primer/ion>: *new technologies for property rights, human rights and global development. A primer*. URL: <http://drones.newamerica.org/primer/>

12. Yan C., Fu L., Zhang J., Wang J. A comprehensive survey on UAV communication channel modeling. *IEEE Access*. 2019.V. 4. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2933173](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933173)

13. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. *IEEE Communications Letters*, 2016. V. 20, No. 8. P. 1647–1650. DOI: [10.1109/LCOMM.2016.2578312](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312)

14. Bui Chi Tkhan', Marin D.V., Rastorguev V.V. Comparison of attenuation of electromagnetic waves in the millimeter and infrared wave range in hydrometeor and dust. *Trudy MAI*. 2015. No. 84. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63128>

15. Burenko E.A. Substantiation of the effectiveness of the use of signals with orthogonal frequency division multiplexing in aviation radio systems of information transmission. *Trudy MAI*. 2022. No. 127. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170344>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-14)

16. Alieva A.D., Guseinova M.V. et al. Issues of attenuation of the inter-electronic electromagnetic impact of the warring parties. *Trudy MAI*. 2023. No. 133. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177667>
17. Tikhomirov A.V., Omel'yanchuk E.V., Semenova A.Yu., Mikhailov V.Yu. Prediction of radio waves propagation parameters when employing low-lying antennas in conditions of urban development. *Trudy MAI*. 2017. No. 97. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87308>
18. Yudin V.N., Kamnev E.A. Principles of creation of anti-navigation interference field. *Trudy MAI*. 2015. No. 83. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62310>
19. Kakar J.A. *UAV communications spectral requirements, MAV and SUAV channel modelling, OFDM waveform parameters, performance and spectrum management*. URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/a4ec2d22-7a08-40e1-91e9-efbbee7c10f4/content>
20. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* (Differential equations and calculus of variations). Moscow, Nauka Publ., 1974. 432 p.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025

Одобрена после рецензирования 26.04.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 21.04.2025; approved after reviewing on 26.04.2025; accepted for publication on 25.06.2025