

беспилотников, в которых участвуют дроны противоборствующих сторон. При этом перед дроном одной из противоборствующих сторон может быть поставлена задача заглушить, или вывести из строя дроны противоборствующей стороны. Целью исследования является определение условий нейтрализации воздействия мощного радиоизлучения, исходящего от дрона специального назначения, функция которого заключается в нейтрализации дронов другой стороны. Рассмотрена схема, в которой для глушения и нейтрализации функционирования дронов первой стороны, вторая сторона конфликта пользуется дроном, несущим мощный генератор заглушающего электромагнитного излучения той же длины волны, на котором работают дроны первой стороны. Рассматривается случай распространения излучения по траектории прямой видимости. Определено условие, обоснованное необходимостью минимально возможного отклонения атакуемого дрона от исходно заданной траектории. Сформулирована и решена задача оптимального ухода от исходно заданной траектории атакуемого дрона из-за воздействия заглушающего электромагнитного излучения. Определено условие достижения минимального воздействия заглушающего электромагнитного излучения дрона второй стороны на дрон первой стороны.

Ключевые слова: радиоизлучение, дрон, глушение, траектория прямой видимости, междронное взаимодействие

Для цитирования: Алиева А.Д., Гусейнова М.В., Гумбатов Д.А. Вопросы ослабления междронного электромагнитного воздействия противоборствующих сторон // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177667>

Original article

ISSUES OF ATTENUATION OF THE INTER-ELECTRONIC ELECTROMAGNETIC IMPACT OF THE WARRING PARTIES

Amida J. Aliyeva¹, Matanat V. Huseynova², Dilan A. Humbatov³

^{1,3}National Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

²Azerbaijan Technical University,
Baku, Republic of Azerbaijan

¹amidec.b@mail.ru

²m.v.huseynova@gmail.com

³h.dilan@mail.ru

Abstract. As of today, the UAVs application covers both peaceful and military spheres of human activity, which highlights various tasks of their functioning optimization and modeling. The wide prevalence and development of theory and practice of the UAV group flights has naturally led to the solution of many issues on ensuring high efficiency of data transmission in the communication networks of the UAV group. In military conflicts, the struggle of the opposing sides often leads to collateral flights of various drones, in which drones of the opposing sides participate. The drone of one of the contending sides herewith may be tasked with silencing or disabling the drones of the opposing side. The purpose of the study is to determine the conditions for neutralizing the effects of powerful radio emission emanating from a special-purpose drone, which function consists in neutralizing drones of the other side. The authors considered a scheme, in which the second party to the conflict employs a drone carrying a powerful generator of silencing electromagnetic radiation of the same wavelength on which the drones of the first party operate to jam and

neutralize the functioning of the drones of the first party. The case of radiation propagation along the line-of-sight trajectory is being considered. The condition justified by the necessity of the minimum possible deviation of the attacked drone from the originally set trajectory is determined. The problem of optimal retreat from the initially set trajectory of the attacked drone due to the effects of damping electromagnetic radiation was formulated and solved. The condition of achieving minimum impact of the damping electromagnetic radiation of the second party drone on the first party drone is determined.

Keywords: radio emission, drone, jamming, line-of-sight trajectory, inter-drone interaction

For citation: Alieva A.J., Huseynova M.V., Gumbatov D.A. Issues of attenuation of the inter-electronic electromagnetic impact of the warring parties. *Trudy MAI*, 2023, no. 133.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177667>

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время широко внедрены в самые различные сферы реальной жизни. Применение БПЛА охватывает как мирные, так и военные сферы человеческой деятельности. Такая широкая сфера применения беспилотников выдвигает на первый план различные задачи оптимизации и моделирования их функционирования [1]. В последнее время широко распространена и развивается теория и практика групповых полетов БПЛА [2,3]. При этом, естественно, возникает необходимость решать задачи обеспечения высокой эффективности передачи данных в сетях связи группы БПЛА [3-5].

Однако, при военных конфликтах борьба противоборствующих сторон часто приводит к таким сопутствующим полетам беспилотников, в которых участвуют

дроны противоборствующих сторон. Вместе с тем, широкое использование дронов в борьбе противоборствующих сторон стимулировало развитие противодронных технических средств. Наиболее распространенным методом противодронной борьбы является использование электромагнитных волн [7]. При этом используются как электромагнитные излучения большой мощности [8], так и излучения различной частоты и различной формы [9-12]. Согласно [13], для вывода из строя управление дроном следует создать напряженность электрического поля свыше 100 В/м. При использовании маломощных излучений упор делается на выбор резонирующих частот, приводящих к неправильному функционированию бортовых управляющих узлов дронов.

Мешающие электромагнитные воздействия, направленные на дроны противной стороны, могут быть сгенерированы как с помощью наземных технических средств, так и с помощью специальной бортовой аппаратуры. В последнее время появляются сообщения о проведении разработок такой аппаратуры, предназначенной для установки на борту дронов. Таким образом, реализуется концепция междронного электромагнитного воздействия, когда дроны одной из противоборствующих сторон создавая мешающее электромагнитное излучение, нарушают нормальное функционирование дронов другой стороны.

Следовательно, говоря о междронном воздействии будем иметь в виду стремление одного из противоборствующих сторон изолировать или нейтрализовать дроны противной стороны путем запуска своего дрона и организации воздействия на дроны противной стороны радиоизлучения большой мощности. В подобной ситуации задачей исследования является вычисление показателей оптимального маневра дрона

противной стороны. Цель такого маневра - максимально ослабить влияние радиоизлучения, исходящего от дрона-нейтрализатора. Очевидно, что вышеописанный сценарий является обратной постановкой известной задачи междронной коммуникации, в которой требуется исследование условий обеспечения надежной коммуникации между дронами одной из вышеуказанных противоборствующих сторон. Задачи такого рода были рассмотрены во многих работах (см. например [14-16]). Вместе с тем, в обратной постановке этой задачи, т.е. применительно к случаю противодействия одного дрона к другому ставится цель максимального ослабления такого противодействия путем вычисления оптимального выбора позиции атакуемого дрона с учетом допустимого отклонения от исходно-заданной траекторией полета.

При этом рассматривается тот случай, когда атакуемый дрон имеет единственную возможность ослабления воздействия атакующей стороны, заключающуюся в удалении от носителя заглушающего радиоизлучателя.

В целом, следует отметить, что коммуникация между двумя объектами классифицируется, как коммуникация по прямой линии видимости (LOS) и коммуникация при отсутствии прямой видимости между сторонами (NLOS). Далее будет считаться, что применительно к взаимодействию двух противоборствующих дронов разумно считать коммуникацию типа LOS, т.к. вероятность появления режима NLOS при полете невысока.

В общем случае, всякое электромагнитное излучение подвергается отражению, дифракции, рассеянию, и другим возможным воздействиям [17] (рис. 1).

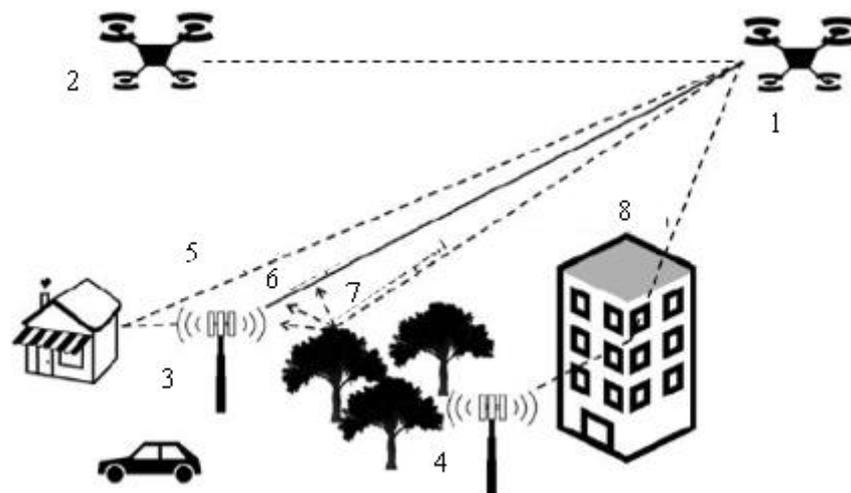


Рис. 1. Пути распространения электромагнитного излучения от дрона (1) к дрону противной стороны (2) и наземным приемникам 3, 4. 5-дистанция отражения; 6-дистанция прямой видимости; 7-дистанция рассеяния; 8-дистанция дифракции

Приемный сигнал наземными приемниками определяется как многопутный сигнал, являющийся суммой сигнала прямой видимости, отраженных, рассеянного и дифрагированного сигнала. При достаточной высоте полета дронов можно считать, что радиоизлучение распространяется по траектории прямой видимости между дронами. В таком случае ослабление радиоизлучения потери сигнала. Согласно [18], принимаемый сигнал подавления определится как

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

где P_T -мощность подавляющего излучения; G_T -усиление антенны передающей стороны; G_R -усиление антенны приемной стороны; λ -длина волны; d -расстояние между дронами. При этом, путевые потери L определяются как [19]

$$L = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2)$$

Задачей исследования в настоящей статье является оптимальный выбор, показателя d таким образом, чтобы воздействие подавляющего радиоизлучения с атакующего дрона на дрон противной стороны было бы минимальным.

Материалы и методы

Введем на рассмотрение показатель не ослабления заглушающего радиоизлучения β , определяемый как

$$\beta = \frac{P_R}{L} \quad (3)$$

С учетом (1) - (3) получим

$$\beta = P_T \cdot G_T \cdot G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^4 \quad (4)$$

Также введем на рассмотрение функцию маневра, атакуемого дрона,

$$d = f(P_T) \quad (5)$$

показывающего возможность удаления атакуемого дрона на расстояние d .

С учетом выражений (4) и (5) имеем

$$\beta = P_T \cdot G_T \cdot G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi f(P_T)} \right)^4 \quad (6)$$

Для упрощения дальнейшей записи введем обозначение постоянных величин в (6)

$$\alpha = \frac{G_T \cdot G_R \cdot \lambda^4}{(4\pi)^4} \quad (7)$$

С учетом (6), (7), запишем

$$\beta = \frac{P_T \alpha}{f(P_T)^4} \quad (8)$$

Введем некоторое ограничение на возможность маневрирования атакуемой стороны

$$\int_0^{P_{T.m}} f(P_T) dP_T = C; C = const \quad (9)$$

Геометрическая интерпретация условия (9) показана на рис. 2.

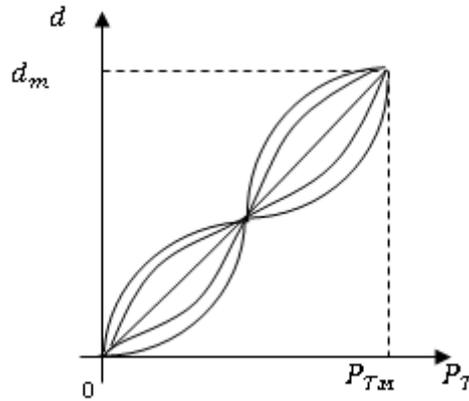


Рис. 2. Геометрическая интерпретация условия ограничения (9)

Условие (9) может быть обосновано необходимостью минимально возможного отклонения, атакуемого дрона от исходно заданной траектории. Сформулируем задачу оптимального ухода, атакуемого дрона от воздействия заглушающего электромагнитного излучения. Целевой функционал задачи оптимизации сформируем в виде

$$F_1 = \frac{1}{P_{T.m}} \cdot \int_0^{P_{T.m}} \frac{P_T \alpha}{f(P_T)^4} dP_T \quad (10)$$

Целью задачи оптимизации является вычисление такой функции $f(P_T)$ при которой F_1 достиг бы минимального значения с учетом ограничительного условия (9).

Для решения указанной задачи на базе выражений (9) и (10) сформируем целевой функционал F_2 безусловной вариационной оптимизации в виде

$$F_2 = \frac{1}{P_{T.m}} \int_0^{P_{T.m}} \frac{P_T \alpha}{f(P_T)} dP_T + z \left[\int_0^{P_{T.m}} f(P_T) dP_T - C \right] \quad (11)$$

Решение задачи (11) согласно [20] должно удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{\frac{P_T\alpha}{P_{T.M}f(P_T)^4} + zf(P_T)\right\}}{df(P_T)} = 0 \quad (12)$$

Из условия (12) получаем

$$\frac{-4P_T\alpha}{P_{T.M}f(P_T)^5} + z = 0 \quad (13)$$

Из выражения (13) находим

$$f(P_T) = \sqrt[5]{\frac{4P_T\alpha}{zP_{T.M}}} \quad (14)$$

Покажем, что при решении (14) функционал F_2 достигает минимума. Для этого достаточно взять производную выражения (13) по $f(P_T)$ и убедиться, что она является всегда положительной величиной.

Рассмотрим вопрос о вычислении множителя Лагранжа. С учетом выражений (9) и (14) напомним

$$\int_0^{P_{T.M}} \sqrt[5]{\frac{4P_T\alpha}{zP_{T.M}}} dP_T = C \quad (15)$$

Выражение (15) перепишем как

$$\sqrt[5]{\frac{4\alpha}{zP_{T.M}}} \int_0^{P_{T.M}} P_T^{\frac{1}{5}} dP_T = C \quad (16)$$

Из (16) находим

$$\left(\frac{5}{6}\right)^5 \sqrt{\frac{4\alpha}{zP_{T.M}}} P_{T.M}^{\frac{6}{5}} = C \quad (17)$$

Из (17) имеем

$$\left(\frac{5}{6}\right)^5 \frac{1}{C^5} \frac{4\alpha}{P_{T.M}} P_{T.M}^6 = \left(\frac{5}{6}\right)^5 \frac{4\alpha P_{T.M}^5}{C^5} \quad (18)$$

С учетом (14) и (18) получаем

$$f(P_T) = \sqrt[5]{\frac{P_T \cdot C^5}{P_{T.M} \left(\frac{5}{6}\right)^5 P_{T.M}^5}} = \frac{6C}{5P_{T.M}} \sqrt[5]{\frac{P_T}{P_{T.M}}} \quad (19)$$

Таким образом, при реализации функции $d = f(P_T)$ в виде (19) обеспечивается минимум значения целевого функционала (11), т.е. достигается максимально возможное ослабление влияния заглушающего электромагнитного излучения.

Заключение

Рассмотрен сценарий, когда для глушения и нейтрализации функционирования дронов в полете первой стороны, вторая сторона конфликта запускает свой дрон, обладающий мощным генератором заглушающего электромагнитного излучения той же длины волны, на котором работает дрон первой стороны. С учетом предположения распространения излучения по траектории прямой видимости вычислено условие достижения минимального воздействия заглушающего электромагнитного излучения дрона второй стороны на дрон первой стороны.

Список источников

1. Нгуен Н.Д., Доан Т.Т., Нгуен Т.Т., Чан К.М., Нгуен К.А., Нго В.Т. Оптимизация и моделирование посадочной траектории для мини-БПЛА с учетом ограничений на управление и посадочную скорость // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174620>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-21)
2. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35507>

3. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57894>
4. Бородин В.В., Петраков А.М. Анализ алгоритмов управления адаптивной сетью передачи данных по локальным параметрам // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30951>
5. Бородин В.В. Выбор параметров управления доступом в сетях с мобильными объектами // Труды МАИ. 2012. № 80. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=57035>
6. Ананьев А.В., Рыбалко А.Г., Иванников К.С., Клевцов Р.П. Динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=119975>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-18](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-18)
7. Kim S.G., Lee E., Hong I.P., Yook J.G. Review of intentional electromagnetic interference on UAV sensor modules and experimental study // Sensors, 2022, vol. 22, pp. 2384. DOI: [10.3390/s22062384](https://doi.org/10.3390/s22062384)
8. Radasky W., Baum C., Wik M. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI) // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, vol. 46, pp. 314-321. DOI: [10.1109/TEMC.2004.831899](https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831899)
9. Donatti M., Frazatto F., Manera L., Teramoto T., Neger E. Radio frequency spoofing system to take over law-breaking drones // In proceedings of the 2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC), Puerto Vallarta, Mexico, 12-14 december 2016. DOI: [10.1109/LAMC.2016.7851290](https://doi.org/10.1109/LAMC.2016.7851290)

10. Adami C., Chmel S., Joster M., Pusch T., Suhrke M. Definition and test of the electromagnetic immunity of UAS for first responders // *Advances in Radio Science*, 2015, vol. 13, pp. 141-147. DOI: [10.5194/ars-13-141-2015](https://doi.org/10.5194/ars-13-141-2015)
11. Zhang D., Zhou X., Cheng E., Wan H., Chen Y. Investigation on effects of HPM pulse on UAV's datalink // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, pp. 829-839. DOI: [10.1109/TEMC.2019.2915285](https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2915285)
12. Hamdalla M., Bissen B., Hunter J.D., Yuanzhuo L., Khilkevich V., Beetner D.G., Caruso A.N., Hassan A. Prediction of experimental electromagnetic coupling to a UAV model using characteristic mode analysis // *Techrxiv*, 2021. DOI: [10.36227/techrxiv.14842749.v1](https://doi.org/10.36227/techrxiv.14842749.v1)
13. Hayashi Y., Homma N., Mizuki T., Aoki T., Sone H. Transient IEMI threats for cryptographic devices // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, pp. 140-148. DOI: [10.1109/TEMC.2012.2206393](https://doi.org/10.1109/TEMC.2012.2206393)
14. Teh S.K., Mejias L., Corke P., Wen H. Experiments in integrating autonomous uninhabited aerial vehicles (UAVs) and wireless sensor networks // In *Proceedings of the Australasian conference on robotics and automation (ACRA 08)*, December 2008.
15. Dios J.R.M., Lferd K., Bernabe A., Nunez G., Torrez-Gonzalez A., Ollero A. Cooperation between UAS and wireless sensor networks for efficient data collection in large environments // *Journal of intelligent robotic systems*, 2013, vol. 70, no. 1-4, pp. 491-508. DOI: [10.1007/s10846-012-9733-2](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9733-2)
16. Allred J., Hasan A. B., Panichsakul S. et al. SensorFlock: an airborne wireless sensor network of micro-air vehicles // In *proceedings of the 5th ACM international conference on*

embedded networked sensor systems (SenSys'07), ACM, Sydney, Australia, November 2007, pp. 117-129.

17. Perera A.G., Al-Naji A., Law Y.W., Chahl J. Human detection and motion analysis from a quadrotor UAV // IOP conference series: materials science and engineering, 2018, vol. 405 (1). DOI: [10.1145/1322263.1322275](https://doi.org/10.1145/1322263.1322275)

18. Perez D., Maza I., Caballero D., Scarlatti D., Casado E., Ollero A. A ground control station for a multi-UAV surveillance system // Journal of intelligent robotic systems, 2013, vol. 69 (1), pp. 119-130. DOI: [10.1007/s10846-012-9759-5](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9759-5)

19. Vinogradov E., Sallouha H., Bast S., Azari M.M., Pollin S. Tutorial on UAVs: a blue sky view on wireless communication // Journal of Mobile Multimedia, 2019, vol. 14 (4), pp. 395-468. DOI: [10.13052/jmm1550-4646.1443](https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1443)

20. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисления. - М.: Наука, 1974. – 432 с.

References

1. Nguen N.D., Doan T.T., Nguen T.T., Chan K.M., Nguen K.A., Ngo V.T. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174620>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-21)

2. Kim N.V., Krylov I.G. *Trudy MAI*, 2012, no. 62. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35507>

3. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57894>

4. Borodin V.V., Petrakov A.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30951>
5. Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 80. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57035>
6. Anan'ev A.V., Rybalko A.G., Ivannikov K.S., Klevtsov R.P. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119975>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-18](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-18)
7. Kim S.G., Lee E., Hong I.P., Yook J.G. Review of intentional electromagnetic interference on UAV sensor modules and experimental study, *Sensors*, 2022, vol. 22, pp. 2384. DOI: [10.3390/s22062384](https://doi.org/10.3390/s22062384)
8. Radasky W., Baum C., Wik M. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI), *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, vol. 46, pp. 314-321. DOI: [10.1109/TEMC.2004.831899](https://doi.org/10.1109/TEMC.2004.831899)
9. Donatti M., Frazatto F., Manera L., Teramoto T., Neger E. Radio frequency spoofing system to take over law-breaking drones, *In proceedings of the 2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC)*, Puerto Vallarta, Mexico, 12-14 december 2016. DOI: [10.1109/LAMC.2016.7851290](https://doi.org/10.1109/LAMC.2016.7851290)
10. Adami C., Chmel S., Joster M., Pusch T., Suhrke M. Definition and test of the electromagnetic immunity of UAS for first responders, *Advances in Radio Science*, 2015, vol. 13, pp. 141-147. DOI: [10.5194/ars-13-141-2015](https://doi.org/10.5194/ars-13-141-2015)
11. Zhang D., Zhou X., Cheng E., Wan H., Chen Y. Investigation on effects of HPM pulse on UAV's datalink, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, pp. 829-839. DOI: [10.1109/TEMC.2019.2915285](https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2915285)

12. Hamdalla M., Bissen B., Hunter J.D., Yuanzhuo L., Khilkevich V., Beetner D.G., Caruso A.N., Hassan A. Prediction of experimental electromagnetic coupling to a UAV model using characteristic mode analysis, *Techrxiv*, 2021. DOI: [10.36227/techrxiv.14842749.v1](https://doi.org/10.36227/techrxiv.14842749.v1)
13. Hayashi Y., Homma N., Mizuki T., Aoki T., Sone H. Transient IEMI threats for cryptographic devices, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, pp. 140-148. DOI: [10.1109/TEMC.2012.2206393](https://doi.org/10.1109/TEMC.2012.2206393)
14. Teh S.K., Mejias L., Corke P., Wen H. Experiments in integrating autonomous uninhabited aerial vehicles (UAVs) and wireless sensor networks, *In Proceedings of the Australasian conference on robotics and automation (ACRA 08)*, December 2008.
15. Dios J.R.M., Lferd K., Bernabe A., Nunez G., Torrez-Gonzalez A., Ollero A. Cooperation between UAS and wireless sensor networks for efficient data collection in large environments, *Journal of intelligent robotic systems*, 2013, vol. 70, no. 1-4, pp. 491-508. DOI: [10.1007/s10846-012-9733-2](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9733-2)
16. Allred J., Hasan A. B., Panichsakul S. et al. SensorFlock: an airborne wireless sensor network of micro-air vehicles // In proceedings of the 5th ACM international conference on embedded networked sensor systems (SenSys'07), ACM, Sydney, Australia, November 2007, pp. 117-129.
17. Perera A.G., Al-Naji A., Law Y.W., Chahl J. Human detection and motion analysis from a quadrotor UAV, *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, vol. 405 (1). DOI: [10.1145/1322263.1322275](https://doi.org/10.1145/1322263.1322275)

18. Perez D., Maza I., Caballero D., Scarlatti D., Casado E., Ollero A. A ground control station for a multi-UAV surveillance system, *Journal of intelligent robotic systems*, 2013, vol. 69 (1), pp. 119-130. DOI: [10.1007/s10846-012-9759-5](https://doi.org/10.1007/s10846-012-9759-5)
19. Vinogradov E., Sallouha H., Bast S., Azari M.M., Pollin S. Tutorial on UAVs: a blue sky view on wireless communication, *Journal of Mobile Multimedia*, 2019, vol. 14 (4), pp. 395-468. DOI: [10.13052/jmm1550-4646.1443](https://doi.org/10.13052/jmm1550-4646.1443)
20. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischisleniya* (Differential equations and calculus of variations), Moscow, Nauka, 1974, 432 p.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023

Одобрена после рецензирования 14.11.2023

Принята к публикации 25.12.2023

The article was submitted on 07.11.2023; approved after reviewing on 14.11.2023; accepted for publication on 25.12.2023