

Труды МАИ. 2022. № 122
Trudy MAI, 2022, no. 122

Научная статья
УДК 623.1.7.
DOI: [10.34759/trd-2022-122-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-21)

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ПИТАНИЯ БПЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ И НАЗЕМНОЙ ВОЗДУШНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

Асланова Айтен Баба гызы

Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана,
Баку, Азербайджанская Республика
aslanova.a.b.@mail.ru

Аннотация. Для обеспечения надежного функционирования БПЛА перспективным решением является беспроводная передача энергии через специализированные наземные базовые станции. Беспроводная передача энергии в настоящее время реализуется в виде лазерной или радиоволновой передачи энергии. Вместе с тем, такие системы энергоснабжения являются дорогостоящими, опасными для населения из-за высокой интенсивности лазерного луча и избыточного электромагнитного излучения. Частичным решением данной проблемы является совместной передача информации и энергии с единой базовой станции. Существует также другое решение проблемы - использование солнечных панелей. Однако, эффективность такого решения пока слишком низка. Предложен метод организации комбинированного энергоснабжения БПЛА, предусматривающий использование

солнечных батарей и лазерной подпитки. Подробно рассмотрен случай облачного неба, когда БПЛА по определению летит на уровне нижней границы облачного покрова.

Сформулирована и решена задача нахождения оптимальной величины высоты этой границы при неизменной высоте верхней границы облачного слоя. Составлен соответствующий алгоритм реализации предложенного метода.

Ключевые слова: БПЛА, солнечная панель, атмосфера, эффективность, энергопитание

Для цитирования: Асланова А.Б. Вопросы оптимизации комбинированного питания БПЛА с использованием солнечных батарей и наземной воздушной передачи энергии лазерным лучом // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-21)

QUESTIONS OF OPTIMIZATION OF THE COMBINED POWER SUPPLY OF THE UAV WITH THE USE OF SOLAR BATTERIES AND GROUND AIR TRANSMISSION OF ENERGY BY A LASER BEAM

Aslanova Ayten Baba gyzy

National Aerospace Agency,

Baku, Azerbaijan Republic

aslanova.a.b.@mail.ru

Abstract. To ensure the reliable operation of the UAV, a promising solution is the wireless transmission of energy through specialized ground base stations. At the same time, such power supply systems are expensive and dangerous for the population due to the high intensity of the laser beam and excessive electromagnetic radiation. A partial solution to this problem is the joint transmission of information and energy from a single base station. There is also another solution to the problem - the use of solar panels. However, the effectiveness of such a solution is still too low. In this case, the power supply of the UAV can be carried out according to the following simple rule (1) If there is a cloud, then the power supply is carried out through ground base stations by sending high-intensity laser beams; (2) If there is no cloud, then solar power supply is used.

The case of a cloudy sky is considered in detail, when the UAV, by definition, flies at the level of the lower boundary of the cloud cover.

The problem of finding the optimal height of this boundary with a constant height of the upper boundary of the cloud layer is formulated and solved. The corresponding algorithm for the implementation of the proposed method has been compiled. The possibility of optimizing the construction of combined power supply systems for UAVs by minimizing the total energy losses along the paths of their propagation is considered. The case of a cloudy sky is considered in detail, when the UAV, by definition, flies at the level of the lower boundary of the cloud cover.

The problem of finding the optimal value of this height with a constant height of the upper boundary of the cloud layer is formulated and solved. The corresponding algorithm for the implementation of the proposed method has been compiled.

Keywords: UAV, solar panel, atmosphere, efficiency, power supply

For citation: Aslanova A.B. Questions of optimization of the combined power supply of the UAV with the use of solar batteries and ground air transmission of energy by a laser beam. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-21](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-21)

Введение

Развитие интегрированных сетей связи типа земля – воздух – космос диктует необходимость решения ряда оптимизационных задач, касающихся таких показателей как скорость передачи информации, энерго- эффективность, интегрированность. Согласно [1], такие сети охватывают высоту 0÷2000 км и включают в себя космические спутники, самолеты, зонды, БПЛА. При построении таких многоуровневых сетей возникают проблемы оптимального выбора или учета таких показателей как скорость передачи информации, задержка сигнала, выбор высоты полета, энергопитание и др. [2-4].

Одним из важнейших задач в построении таких сетей передачи информации является оптимальная организация энергопитания БПЛА, являющихся одним из ее важнейших звеньев. В настоящее время в качестве альтернативных вариантов энергообеспечения БПЛА рассматриваются такие решения как солнечные батареи, водородные топливные ячейки, полимерные батареи из лития и др. [5,6].

Как отмечается в работе [7], высокие функциональные возможности БПЛА делают их незаменимыми в организации связи между высотными узлами

интегрированной коммуникационной сети и конкретными потребителями информации.

Согласно [8], для обеспечения надежного функционирования БПЛА перспективным решением считается беспроводная передача энергии через специализированные наземные базовые станции. Существуют различные варианты беспроводной передачи энергии, такие как лазерная передача энергии, и радиоволновая передача энергии [9,10]. Вместе с тем, как справедливо отмечается в [8], такие системы энергоснабжения являются дорогостоящими, опасными для населения из-за высокой интенсивности лазерного луча и избыточного электромагнитного излучения. Частичным решением данной проблемы явился появление совместной передачи информации и энергии с единой базовой станции [11,12]. Другим вариантом решения задачи было разработка оптимальных траекторий полета БПЛА [13-15]. Однако, такие дополнительные ограничения на выбор траектории полета БПЛА не позволяют достичь высокой общей эффективности их функционирования [5]. Логичным выходом из положения является использование солнечных панелей на борту БПЛА [16-19]. Так, например, в работе [16] сообщается о длительности полета равной 28 часов при использовании солнечных панелей на борту БПЛА. Вместе с тем, использование солнечной энергии во многом зависит от атмосферных условий, т.е. от пропускания атмосферы. С учетом вышеуказанного, представляется наиболее рациональным выходом из положения является совместное использование солнечных панелей и лазерной

передачи энергии через базовые станции. При этом энергообеспечение БПЛА можно осуществить по следующему простому правилу:

1. Если существуют облако, то энергообеспечение осуществляется через наземные базовые станции путем посылки высоко интенсивных лазерных лучей.
2. Если облако отсутствуют, то используется энергообеспечение с помощью солнечных панелей.

В настоящей статье рассматривается возможность оптимизации построения таких комбинированных систем энергоснабжения БПЛА путем минимизации суммарных потерь энергии в таких системах.

2. Предлагаемый метод

Рассмотрим упрощенное представление предлагаемой системы комбинированного энергопитания БПЛА (рис. 1).

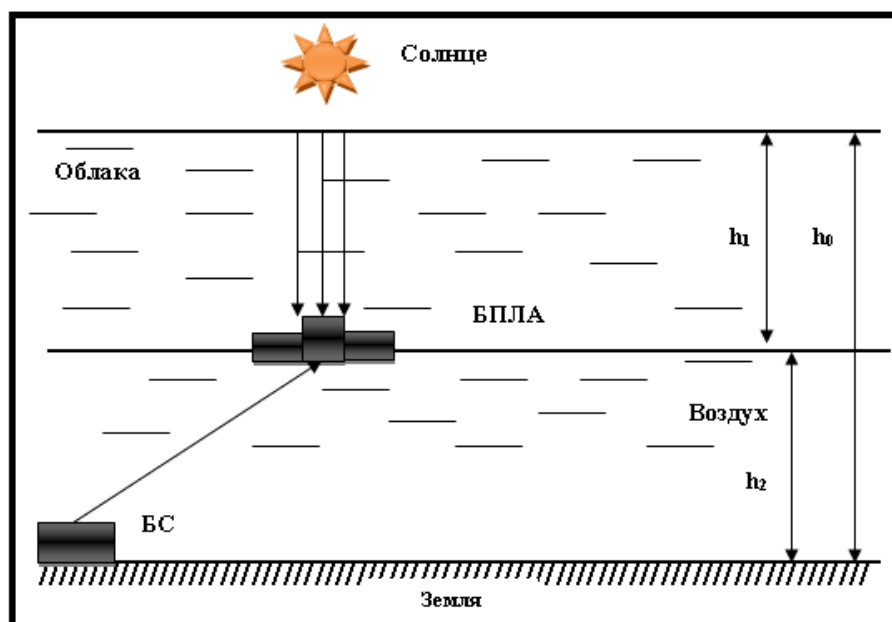


Рис. 1. Упрощенная схема комбинированного энергопитания БПЛА. Принятые обозначения: h_1 – высота облачного покрова; h_2 – высота полета БПЛА; h_0 – высота верхней границы облачного покрова

В общем случае, суммарное ослабление энергии из – за влияния атмосферы можно определить следующим образом:

$$S_{\Sigma} = f(P_1, S_1, S_2, \beta_1, \beta_2, I_1, I_2) \quad (1)$$

где I_1 – исходная интенсивность Солнечных лучей; I_2 – исходная интенсивность лазера в базовой станций; P_1 – вероятность появления облаков; S_1 – ослабление солнечных лучей из – за облаков; S_2 – ослабление лазерного луча из – за воздействия атмосферы по трассе “Земля – БПЛА”; β_1 – эффективность подсистемы энергоснабжения с помощью солнечных панелей; β_2 – эффективность подсистемы энергоснабжения БПЛА с помощью высокоинтенсивного лазерного луча.

В целом, так как эти подсистемы работают не параллельно, а последовательно, то суммарное ослабление определим, используя два метода расчета:

1. Метод усреднения с помощью скалярной линейной свертки:

$$S_{\Sigma 1} = P_1 \cdot I_1 \cdot S_1 \cdot \beta_1 + (1 - P_1) I_2 \cdot S_2 \cdot \beta_2 \quad (2)$$

2. Метод геометрического усреднения:

$$S_{\Sigma 2} = (I_1 \cdot S_1 \cdot \beta_1)^{P_1} \cdot (I_2 \cdot S_2 \cdot \beta_2)^{(1-P_1)} \quad (3)$$

Далее для упрощения дальнейших математических выкладок примем постоянство следующих показателей: $P_1, I_1, \beta_1, I_2, \beta_2, h_0$.

Проанализируем возможность учета S_1 и S_2 в оценках (2) и (3).

Согласно [20], ослабление солнечного луча в гуще облаков толщиной h_1 определяется по следующей формуле

$$S_1 = \exp(-\varepsilon h_1) \quad (4)$$

где ε – коэффициент поглощения облаков.

Что касается ослабления лазерного луча, то здесь известны следующие оценки.

Согласно [4], при безоблачной погоде потери лазерного луча P_λ могут быть оценены как

$$P_\lambda = ah_2 = a(h_0 - h_1) \quad (5)$$

где a – коэффициент ослабления.

Следовательно, ослабление лазерного луча оценим как

$$S_{21} = I_2 - I_2 ah_2 = I_2(1 - ah_2) \quad (6)$$

или

$$S_{21} = I_2[1 - a(h_0 - h_1)]$$

Вместе с тем, согласно [3] ослабление лазерного луча может быть оценено как

$$S_{22} = \exp(-mh_2) \quad (7)$$

где m – коэффициент ослабления.

Выражение (7) перепишем как

$$S_{22} = \exp[-m(h_0 - h_1)] \quad (8)$$

С учетом оценок (2), (4) и (5) определим оптимальную величину h_1 когда $S_{\Sigma 1}$ достигает минимального значения.

$$S_{\Sigma 1} = [\exp(\varepsilon h_1)]P_1 I_1 \beta_1 + (1 - P_1)I_2 \beta_2 [1 - a(h_0 - h_1)] \quad (9)$$

Исследуя (9) на экстремум по h_1 получим следующее условие

$$-P_1 I_1 \beta_1 \cdot \varepsilon \cdot \exp(\varepsilon h_1) + (1 - P_1)I_2 \beta_2 a = 0 \quad (10)$$

Из выражения (10) имеем

$$\exp(-\varepsilon h_1) = \frac{(1-P_1)I_2 \beta_2 a}{P_1 I_1 \beta_1 \varepsilon} \quad (11)$$

Из (11) находим

$$h_{1opt} = \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{P_1 I_1 \beta_1 \varepsilon}{(1-P_1)I_2 \beta_2 a} \quad (12)$$

Следовательно, при оценке (18) $S_{\Sigma 1}$ достигает экстремума. Для выявления типа экстремума проанализировав $\frac{d^2 S_{\Sigma 1}}{dh_1}$ можно показать, что этот показатель является положительной величиной, т.е. $S_{\Sigma 1}$ при условии (12) достигает минимума.

Рассмотрим задачу определения h_{1opt} применительно к оценкам (3), (4) и (8).

Имеем:

$$S_{\Sigma 2} = [\exp(-\varepsilon h_1)]^{P_1} \cdot \exp[-m(h_0 - h_1)]^{1-P_1} \quad (13)$$

Выражение (13) перепишем как

$$S_{\Sigma 2} = \exp(-P_1 \varepsilon h_1) \cdot \exp[-(1 - P_1) \cdot m(h_0 - h_1)] \quad (14)$$

Из (14) получаем

$$S_{\Sigma 2} = \exp[-P_1 \varepsilon h_1 - (1 - P_1) \cdot m(h_0 - h_1)] \quad (15)$$

Исследуя (15) на экстремум получим условие

$$-P_1 \varepsilon h_1 - (1 - P_1) \cdot m(h_0 - h_1) = 0 \quad (16)$$

Из (16) находим

$$h_1[-P_1 \varepsilon + m(1 - P_1)] \quad (17)$$

Из (17) получим

$$h_1 = \frac{(1-P_1)mh_0}{m(1-P_1)-P_1\varepsilon} \quad (18)$$

Таким образом при условии (18) $S_{\Sigma 2}$ достигает экстремума.

Исследуем тип экстремума.

$$\frac{d^2 S_{\Sigma 1}}{dh_1^2} = -P_1 \varepsilon + m(1 - P_1) = -(P_1 \varepsilon + mP_1) + m$$

Таким образом, если

$$m > P_1 \varepsilon + mP_1 = P_1(\varepsilon + m)$$

или при

$$\frac{m}{\varepsilon + m} > P_1 \quad (19)$$

$S_{\Sigma 2}$ достигает минимума.

Как видно из условия (19) чем выше вероятность P_1 тем меньше вероятность того, что будет достигнут минимум суммарных потерь.

3. Вопросы практической реализации результатов

Что касается реализации вышеизложенных условий оптимизации, то здесь необходимо учесть, что выражения (12) и (18) получены при условии $h_0 = const$.

Так как толщина облачного слоя является неуправляемой величиной, то непосредственное применение условий (12) и (18) затруднительно. Для реализации этих условий можно предложить следующий алгоритм:

1. Все имеющиеся базовые станции лазерной подпитки подразделяются на отдельные группы, в которых показатель h_0 приблизительно одинаково.
2. Во всех группах осуществляется поиск такой базовой станции, у которой h_1 соответствует величине, вычисленной по выражению (12) или (18).
3. Обнаруженные в каждой группе базовые станции, у которых h_1 соответствует величине, вычисленной по формуле (12) или (18) объявляются наиболее пригодными для лазерной подпитки БПЛА.

Заключение

Предложен метод организации комбинированного энергоснабжения БПЛА, предусматривающий совместное использование солнечных батарей и лазерной подпитки. Подробно рассмотрен случай облачного неба, когда БПЛА по определению летит на уровне нижней границы облачного покрова.

Сформулирована и решена задача нахождения оптимальной величины этой высоты при неизменной высоте верхней границы облачного слоя. Составлен соответствующий алгоритм реализации предложенного метода.

Список источников

1. Cui J., Ng Xin S., Liu D., Zhang J., Nallanathan A., Hanzo L. Multi-Objective Optimization for Integrated Ground-Air-Space Networks // IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021. DOI:[10.1109/MVT.2021.3085511](https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3085511)
2. Чернецкая И.Е., Спевакова С.В. Мультиспектральное оптико-электронное устройство для автономной мобильной платформы экологического мониторинга // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119001>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-14)
3. Асланова А.Б. Оптимизация режимных показателей батарейных БПЛА с дифференциальным сбросом веса полезной нагрузки // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=159794>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-16)
4. Агаев Ф.Г., Асадов Х.Г., Асланова А.Б. Много функциональные беспилотные летательные аппараты. Оптимизация и синтез с учетом воздействия шумов // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=156313>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-16)
5. Betancourth N. J. P., Villamarin J. E. P., Rios J. J. V. Bravo-Mosquera P. D., Ceron-Munoz H. D. Design and manufacture of a solar-powered unmanned aerial vehicle for civilian surveillance missions // Journal of Aerospace Technology and Management, 2016, vol. 8 (4), pp. 385-396. DOI:[10.5028/jatm.v8i4.678](https://doi.org/10.5028/jatm.v8i4.678)
6. Джахидзаде Ш.Н. Вопросы оптимизации использования дополнительных солнечных панелей для питания узлов беспилотных летательных аппаратов // Труды

МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109570>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-17](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-17)

7. Lu R-R., Ma Y., Lin S-H., Zhang B., Wang Q., Wang J-Y. Energy-efficient trajectory optimization for UAV-based hybrid FSO/RF communications with buffer constraints // Entropy, 2021, vol. 23 (12), pp. 1596. DOI: [10.3390/e23121596](https://doi.org/10.3390/e23121596)

8. Abou-Rjely C., Kaddoum G., George K. Ground-to-air FSO communications: when high data rate communication meets efficient energy harvesting with simple designs // Optics Express, 2019, vol. 27 (23), pp. 34079. DOI: [10.1364/OE.27.034079](https://doi.org/10.1364/OE.27.034079)

9. Makki B., Svensson T., Bruisman K., Perez J., Alouini M-S. Wireless energy and information transmission in FSO and Rf-FSO links // IEEE Wireless Communication Letters, 2018, vol. 7 (1), pp. 90-93. DOI: [10.1109/LWC.2017.2755658](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2755658)

10. Богушевская В.А., Заяц О.В., Масляков Я.Н., Мацак И.С., Никонов А.А., Савельев В.В., Шептунов А.А. Разработка системы дистанционного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 51. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29047>

11. Varshney L.R. Transporting information and energy simultaneously // IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2008, pp. 1612-1616. DOI: [10.1109/ISIT.2008.4595260](https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595260)

12. Perera T. D. P., Layakody D. N. K., Sharma S. K., Chatzinotas S., Li J. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, vol. 20 (1), pp. 264-302. DOI: [10.1109/COMST.2017.2783901](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901)

13. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems // IEEE Transactions on Communications, 2016, vol. 64, no. 12, pp. 4983-4996. DOI:[10.1109/TCOMM.2016.2611512](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2611512)
14. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017. DOI:[10.1109/TWC.2017.2789293](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293)
15. Zhang G., Wu Q., Cui M., Zhang R. Securing UAV communications via trajectory optimization // IEEE Global Communications Conference, 2017, pp. 1-5.
16. Morton S., DSa R., Papanikolopoulos N. Solar powered UAV: Design and Experiments// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 2015, pp. 2460-2466. DOI:[10.1109/IROS.2015.7353711](https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353711)
17. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons, 2006.
18. Kokhanovsky A. Optical properties of terrestrial clouds // Earth -Science Reviews, 2004, vol. 64, no. 3, pp. 189-241. DOI:[10.1016/S0012-8252\(03\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00042-4)
19. Lee J. S., Yu K. H. Optimal Path Planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 1442-1451. DOI:[10.1109/TAES.2017.2671522](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2671522)
20. Sun Y., Ng Kwan W., Xu D., Dai L., Schober R. Resource allocation for solar powered UAV communication systems // IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018. DOI:[10.1109/SPAWC.2018.8445944](https://doi.org/10.1109/SPAWC.2018.8445944)

References

1. Cui J., Ng Xin S., Liu D., Zhang J., Nallanathan A., Hanzo L. Multi-Objective Optimization for Integrated Ground-Air-Space Networks, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021. DOI:[10.1109/MVT.2021.3085511](https://doi.org/10.1109/MVT.2021.3085511)
2. Chernetskaya I.E., Spevakova S.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119001>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-14)
3. Aslanova A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159794>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-16)
4. Agaev F.G., Asadov Kh.G., Aslanova A.B. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156313>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-16)
5. Betancourth N. J. P., Villamarin J. E. P., Rios J. J. V. Bravo-Mosquera P. D., Ceron-Munoz H. D. Design and manufacture of a solar-powered unmanned aerial vehicle for civilian surveillance missions, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2016, vol. 8 (4), pp. 385-396. DOI:[10.5028/jatm.v8i4.678](https://doi.org/10.5028/jatm.v8i4.678)
6. Dzhakhidzade Sh.N. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109570>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-17](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-17)
7. Lu R-R., Ma Y., Lin S-H., Zhang B., Wang Q., Wang J-Y. Energy-efficient trajectory optimization for UAV-based hybrid FSO/RF communications with buffer constraints, *Entropy*, 2021, vol. 23 (12), pp. 1596. DOI: [10.3390/e23121596](https://doi.org/10.3390/e23121596)

8. Abou-Rjely C., Kaddoum G., George K. Ground-to-air FSO communications: when high data rate communication meets efficient energy harvesting with simple designs, *Optics Express*, 2019, vol. 27 (23), pp. 34079. DOI:[10.1364/OE.27.034079](https://doi.org/10.1364/OE.27.034079)
9. Makki B., Svensson T., Bruisman K., Perez J., Alouini M-S. Wireless energy and information transmission in FSO and Rf-FSO links, *IEEE Wireless Communication Letters*, 2018, vol. 7 (1), pp. 90-93. DOI:[10.1109/LWC.2017.2755658](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2755658)
10. Bogushevskaya V.A., Zayats O.V., Maslyakov Ya.N., Matsak I.S., Nikonov A.A., Savel'ev V.V., Sheptunov A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29047>
11. Varshney L.R. Transporting information and energy simultaneously, *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2008, pp. 1612-1616. DOI:[10.1109/ISIT.2008.4595260](https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595260)
12. Perera T. D. P., Layakody D. N. K., Sharma S. K., Chatzinotas S., Li J. Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, vol. 20 (1), pp. 264-302. DOI:[10.1109/COMST.2017.2783901](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783901)
13. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems, *IEEE Transactions on Communications*, 2016, vol. 64, no. 12, pp. 4983-4996. DOI:[10.1109/TCOMM.2016.2611512](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.2611512)
14. Wu Q., Zeng Y., Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017. DOI:[10.1109/TWC.2017.2789293](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293)

15. Zhang G., Wu Q., Cui M., Zhang R. Securing UAV communications via trajectory optimization, *IEEE Global Communications Conference*, 2017, pp. 1-5.
16. Morton S., DSa R., Papanikolopoulos N. Solar powered UAV: Design and Experiments, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, September 2015, pp. 2460-2466. DOI:[10.1109/IROS.2015.7353711](https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353711)
17. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, 2006.
18. Kokhanovsky A. Optical properties of terrestrial clouds, *Earth -Science Reviews*, 2004, vol. 64, no. 3, pp. 189-241. DOI:[10.1016/S0012-8252\(03\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(03)00042-4)
19. Lee J. S., Yu K. H. Optimal Path Planning of solar-powered UAV using gravitational potential energy, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 1442-1451. DOI:[10.1109/TAES.2017.2671522](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2671522)
20. Sun Y., Ng Kwan W., Xu D., Dai L., Schober R. Resource allocation for solar powered UAV communication systems, *IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018. DOI:[10.1109/SPAWC.2018.8445944](https://doi.org/10.1109/SPAWC.2018.8445944)

Статья поступила в редакцию 07.01.2022; одобрена после рецензирования 22.01.2022; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 07.01.2022; approved after reviewing on 22.01.2022; accepted for publication on 21.02.2022.