

Исследование оптимальных режимов функционирования БПЛА в беспроводных сетях передачи информации

Агаев Ф.Г.^{1*}, Асадов Х.Г.^{2}, Зульфугарлы П.Р.^{3***}**

¹ *Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, ул. С.С. Ахундова, 1, Баку, AZ1106, Азербайджан*

² *Научно-исследовательский институт Аэрокосмической информатики, пр. Азадлыг, 159, Баку, AZ1106, Азербайджан*

³ *Азербайджанский технический университет, просп. Гусейна Джавида, 25, Баку, 370073, Азербайджан*

*e-mail: agayev.tekti@mail.ru

**e-mail: asadzade@rambler.ru

***e-mail: Peri.rzayeva30@gmail.com

Статья поступила 04.07.2021

Аннотация

Статья посвящена исследованию оптимальных режимов функционирования БПЛА в беспроводных сетях передачи информации. Рассмотрены две задачи, оптимизации функционирования БПЛА в беспроводных сетях передачи информации. В первой задаче проанализированы условия достижения постоянства пропускной способности канала передачи информации. Получено конкретно условие, при выполнении которого такое постоянство обеспечивается. Во второй задаче определяются условия, при которых интегральная величина пропускной способности достигает экстремальной величины.

Определенно, что такой экстремум в виде минимума пропускной способности может появиться при выполнении следующих условий: (а) допускается наличие

функции издержек в виде функциональной связи $\sigma = \sigma(P(t))$, где σ – среднеквадратическое отклонение белого шума, $P(t)$ -мощность передаваемого сигнала; (b) допускается ограничение на интегральную величину этой функции.(с) обеспечивается прямая функциональная зависимость между указанными показателями.

Ключевые слова: передача информации, оптимизация, БПЛА, пропускная способность, беспроводная сеть.

1. Введение

Вне сомнения, одна из перспективных областей применения БПЛА является передача сообщения в беспроводных сетях передачи информации, которая должно быть осуществлена с максимальной пропускной способностью используемых частотных каналов. Вместе с тем, БПЛА обладают возможностью использовать режимы передачи информации по каналам как с прямой видимостью, так и по каналам без такой видимости путем полета на заданной оптимальной высоте. В работах [1-7] были изложены вопросы организации связи в пределах групп БПЛА и используемые при этом стандарты. Порядок обмена информацией между БПЛА основывается на технологии связи, активно разрабатываемой в развитых странах мира [8-12]. Вопросы использования БПЛА в беспроводных сетях различного назначения были рассмотрены в ряде работ (см. например. [13 ÷ 18]). Как отмечается в работе [19], наиболее значимым и классическим критерием для оценки эффективности систем передачи информации в беспроводных сетях был и остается

формула Шеннона для оценки пропускной способности, имеющая следующий вид [19]:

$$C(t) = N(t) \cdot \log_2 \left[1 + \frac{P(t) \cdot h(t)}{\sigma^2} \right] \quad (1)$$

где $P(t)$ - мощность передаваемого сигнала; σ - с.к.о. аддитивного белого шума; $h(t)$ - усиление канала, образуемого коммуникационными линиями как прямого видения, так и непрямого видения; $N(t)$ - количество элементов сообщения.

Усиление канала $h(t)$, согласно [19] определяется как

$$h(t) = \frac{1}{\eta(t)_0} \quad (2)$$

где $\eta(t)_0$ - средняя величине потерь на путях распространения сигнала.

Как было отмечено выше, сигнал имеет две пути распространения, и следовательно, каждый из этих путей имеет свои потери.

Так, потери в пути распространения непрямого видения определяются как [19]:

$$\eta_{np}(t) = \delta_1 \cdot \left[\frac{4\pi f \cdot h}{C_\ell} \right]^\alpha \cdot P_{np}(t) \quad (3)$$

Потери сигнала в пути распространения непрямого видения определяются как [19]:

$$\eta_{np}(t) = \delta_2 \cdot \left[\frac{4\pi f \cdot h}{C_\ell} \right]^\alpha \cdot P_{нен}(t) \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) приведены следующие показатели: C_ℓ - скорость распространения света; δ_1 и δ_2 - коэффициенты избыточных путевых потерь для соответственно прямой и не прямой пути распространения; $P_{пр}(t)$ - вероятность связи по прямой пути; $P_{пер}(t)$ – вероятность связи по не прямой пути; f - частота сигнала; α - показатель ослабления; $\pi=3.14$; h – высота полета БПЛА (рис.1).

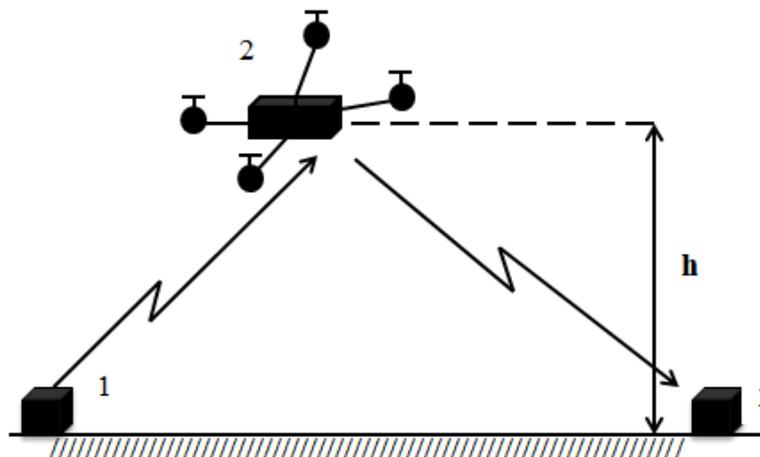


Рис. 1. Схематическое представление использования БПЛА для передачи сигнала в беспроводных сетях передачи сообщения. Принятые обозначения : 1,3 – пункты приема – передачи; 2 – БПЛА; h - высота полета.

При этом учитывается, что

$$P_{пр}(t) = 1 - P_{пер}(t) \quad (5)$$

Целью проводимого исследования является:

1. Определение параметров оптимального режима передачи где показатель $C(t)$ имеет постоянную во времени величину (т.е.. пропускная способность неизменна).

2. Определение параметров оптимального режима функционирования БПЛА, когда при постоянной величине интегральной функции издержек интегральная величина пропускной способности достигает экстремума.

2. Предлагаемый метод решения задач

2.1. Решение задачи обеспечения постоянстве значения пропускной способности

В соответствии с (1)÷(4) при $N(t)=const$; $\sigma=const$ условие постоянства величины $C(t)$ эквивалентно следующему условию

$$\eta(t)_0 = const \quad (6)$$

или

$$\eta(t)_0 = \eta_{np}(t) + \eta_{nen}(t) = C_1 \quad \text{где } C_1=const \quad (7)$$

С учетом (3), (4), (7) получим

$$\delta_1 \left[\frac{4\pi fh}{C_\ell} \right]^\alpha \cdot P_{np}(t) + \delta_2 \left[\frac{4\pi fh}{C_\ell} \right]^\alpha P_{nen}(t) = C_1 \quad (8)$$

При принятых допущениях вероятной причиной изменения $\eta(t)$ является изменение высоты полета, а также $P_{np}(t)$ и $P_{пер}(t)$.

Учитывая выражения (5), (8) и (9) получим:

$$\delta_1 \left[\frac{4\pi fh}{C_\ell} \right]^\alpha \cdot P_{np}(t) + \delta_0 \left[\frac{4\pi fh}{C_\ell} \right]^\alpha - \delta_2 \left[\frac{4\pi fh}{C_\ell} \right]^\alpha P_{np}(t) = C_1 \quad (10)$$

С учетом выражений (5), (9) и (10) получим

$$\eta[h(t), P_{np}(t)] = P_{np}(t) \cdot \left(\frac{4\pi f h}{C_\ell} \right)^\alpha (\delta_1 - \delta_2) + \delta_2 \left(\frac{4\pi f h}{C_\ell} \right)^\alpha \quad (11)$$

Получим полный дифференциал от $\eta[h(t), P_{np}(t)]$.

Имеем

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dt} = & \left(\frac{4\pi f h}{C_\ell} \right)^\alpha (\delta_1 - \delta_2) \cdot \frac{dP_{np}(t)}{dt} + \\ & + \left[P_{np}(t) \cdot \alpha (h)^{\alpha-1} (\delta_1 - \delta_2) \cdot \left(\frac{4\pi f}{C_\ell} \right)^\alpha + \alpha \cdot \delta_2 \left(\frac{4\pi f}{C_\ell} \right)^\alpha \cdot h^{\alpha-1} \right] \frac{dh}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

из (12) получаем

$$h^\alpha (\delta_1 - \delta_2) \cdot \frac{dP_{np}(t)}{dt} + \left[P_{np}(t) \cdot \alpha (h)^{\alpha-1} (\delta_1 - \delta_2) + \alpha \cdot \delta_2 \cdot h^{\alpha-1} \right] \frac{dh}{dt} = 0 \quad (13)$$

Приняв

$$\frac{dP_{np}(t)}{dt} = d_1 = const \quad (14)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = d_2 = const \quad (15)$$

из (13) находим:

$$h(\delta_1 - \delta_2) \cdot d_1 + \left[P_{np}(t) \cdot \alpha \cdot (\delta_1 - \delta_2) + \alpha \cdot \delta_2 \right] d_2 = 0 \quad (14)$$

Из (14) имеем

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{P_{np}(t) \cdot \alpha (\delta_1 - \delta_2) + \alpha \cdot \delta_2}{\delta_1 - \delta_2} \quad (15)$$

Таким образом, равенство (15) является условием постоянства пропускной способности канала коммуникации, образуемой с помощью БПЛА в беспроводных сетях передачи информации.

2.2. Рассмотрим задачу оптимизации усредненного режима функционирования БПЛА

В качестве независимого показателя рассмотрим мощность передаваемого сигнала $P(t)$. Введем на рассмотрение функцию издержек в виде

$$\sigma = \sigma(P(t)) \quad (16)$$

Запись (16) означает функциональную зависимость с.к.о. гауссовского шума в канале от мощности посылаемого сигнала. Интегральную функцию издержек определим как

$$\chi_1 = \int_0^{P(t)_{\max}} \sigma(P(t)) dt \quad (17)$$

Примем, что величина χ_1 не должна превышать предельную величину C_2 ; $C_2 = \text{const}$.

С учетом выражения (1), основной целевой функционал оптимизации имеет вид

$$\chi_2 = \int_0^{P(t)_{\max}} N \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P(t) dt}{\sigma(P(t))} \right) dt \quad (18)$$

Совместное решение оптимизационной задачи применительно к пропускной способности с учетом ограничений по издержкам может быть получено путем анализа следующего целевого функционала

$$\chi_{1,2} = \int_0^{P(t)_{\max}} N \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P(t)dt}{\sigma(P(t))} \right) dt + \lambda \left[\int_0^{P(t)_{\max}} \sigma(P(t))dt - C_2 \right] \quad (19)$$

где λ – множитель Лагранжа.

При этом, оптимальная функция $\sigma(P(t))$ должна удовлетворять условию[20]

$$\frac{N \left(-\frac{P(t) \cdot h(t)}{\sigma^2(P(t))} \right) \cdot \sigma(P(t))}{\sigma(P(t)) + P(t) \cdot \sigma} + \lambda = 0 \quad (20)$$

или

$$N \left(\frac{-P(t) \cdot h(t)}{\sigma^2(P(t)) + P(t) \cdot \sigma(P(t)) \cdot \sigma} \right) + \lambda = 0 \quad (21)$$

Из (21) получаем следующее квадратное уравнение

$$\sigma^2(P(t)) + \sigma(P(t)) \cdot P(t) \cdot h(t) - \frac{N \cdot P(t) \cdot h(t)}{\lambda} = 0 \quad (22)$$

Решение (22) имеет вид

$$\sigma(P(t)) = -\frac{P(t) \cdot h(t)}{2} + \sqrt{\frac{P^2(t)h(t)^2}{4} + \frac{NP(t)h(t)}{\lambda}} \quad (23)$$

Таким образом, с помощью (23) и (17) можно вычислить величину λ , значение которой обозначим как $\lambda_0(C_2)$.

Таким образом, окончательный вид решения задачи следующий:

$$\sigma(P(t)) = -\frac{P(t) \cdot h(t)}{2} \pm \sqrt{\frac{P^2(t)h(t)^2}{4} + \frac{NP(t)h(t)}{\lambda_0(C_2)}} \quad (24)$$

Для определения типа оптимального режима достаточно вычислить вторую производную (22) по искомой функции $\sigma(P(t))$ и убедиться, что результат вычисления является положительной величиной.

Следовательно, при решении (24) χ_2 достигает минимума. Так как, решение (24) подразумевает обеспечение прямой функциональной зависимости между σ и $P(t)$, то эвристически ясно, что максимальная пропускная способность может быть достигнута при наличии обратной связи между указанными показателями.

3. Заключение

Таким образом, рассмотрены две задачи, касающиеся оптимизации режимов функционирования БПЛА в беспроводных сетях передачи информации.

Целью исследования в первой задаче явилось нахождение условий, когда пропускная способность канала передачи информации остается постоянной величиной. Получено конкретно условие, при выполнении которого такое постоянство обеспечивается.

Целью исследования во второй задаче является нахождение условия, при выполнении которого интегральная величина пропускной способности может достичь экстремальной величины.

Определенно, что такой экстремум в виде минимума пропускной способности появляется при выполнении следующих условий: (а) допускается наличие функциональной связи $\sigma = \sigma(P(t))$ в виде функции издержек; (б) допускается ограничение на интегральную величину этой функции.

Библиографический список

1. 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: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894>
2. Бородин В.В., Петраков А.М. Анализ алгоритмов управления адаптивной сетью передачи данных по локальным параметрам // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57035>
3. Шевцов В.А., Бородин В.В., Крылов М.А. Построение совмещённой сети сотовой связи и самоорганизующейся сети с динамической структурой // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66417>
4. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69735>
5. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационная модель для оценки адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93398>
6. Талаев А.В., Бородин В.В. Стандарты LPWAN для группового взаимодействия мобильных узлов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91644>
7. Леонов А.В., Чаплышкин В.А. Сети FANET // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 297 - 301.

8. Гуревич О.С., Кессельман О.Г., Трофимов А.С., Чернышов В.И. Современные беспроводные технологии на авиационном борту // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81143>
9. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: НТБ. 2010. № 3 (101). С. 80 - 87.
10. Слюсар В. Радиолинии связи с БПЛА. Примеры реализации // Электроника: НТБ. 2010. № 5 (103). С. 56 – 61.
11. Самарцев Н.С., Колотилов Е.Д., Кошелев Б.В. Алгоритм обмена данными по цифровой линии передачи данных «земля-борт-земля» // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80448>
12. Польшинкин А.В., Ле Х.Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7. С. 98 - 107.
13. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage // IEEE Communications Letters, 2016, vol. 20, no. 8, pp. 1647 - 1650. DOI:[10.1109/LCOMM.2016.2578312](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312)
14. Qiu C., Wei Z., Feng Z., Zhang P. Joint resource allocation, placement and user association of multiple UAV – mounted base stations with in – band wireless backhaul // IEEE Wireless Communications Letters, 2019, vol. 8, no. 6, pp. 1575 - 1578.
15. Yin S., Zhao Y., Li L. Resource allocation and base station placement in cellular networks with wireless powered UAVs // IEEE International Conference on

Communications (ICC), 2019, vol. 68, no. 1, pp. 1050 - 1055.

DOI:[10.1109/ICC.2019.8761872](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761872)

16. Zhan P., Yu K., Swindlehurst A.L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: performance and optimization // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 2068 - 2085. DOI:
[10.1109/TAES.2011.5937283](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5937283)

17. Zhao W., Ammar M., Zegura E. A message ferrying approach for data delivery on sparse mobile ad hoc networks // Proc. 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, 2004, pp. 187 - 198. URL:
<https://doi.org/10.1145/989459.989483>

18. Zhan C., Zeng Y., Zhang R. Energy – efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network // IEEE Wireless Communication Letters, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 328 - 331. DOI:[10.1109/LWC.2017.2776922](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2776922)

19. Ahmed S., Chowdhury M. Z., Jang Y.M. Energy – efficient UAV – to – user scheduling to maximize throughput in wireless networks // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 21215 - 21225.

20. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1973. - 432 с.

Studying optimal UAV functioning modes in wireless information transmission networks

Agayev F.G.^{1*}, Asadov H.H.^{2}, Zulfugarly P.R.^{3***}**

*¹Institute for Space Research of Natural Resources National Aerospace Agency,
1, S.S. Akhundov str., Baku, AZ1106, Azerbaijan*

*²Scientific and Research Institute of Aerospace Informatics,
159, Azadlig ave., Baku, AZ1106, Azerbaijan*

³Azerbaijan Technical University, 25, Hussein Javid prosp., Baku, 370073, Azerbaijan

**e-mail: agayev.tekti@mail.ru*

***e-mail: asadzade@rambler.ru*

****e-mail: Peri.rzayeva30@gmail.com*

Abstract

The article deals with studying optimal UAV functioning modes in wireless information transmission networks. It considers two optimization problems of the UAV functioning in wireless information transmission networks. The purpose of the study consists in (a) parameters determining of optimal transmission mode where the throughput $C(t)$ is of constant value (i.e. the throughput is invariable); and (b) parameters determining of the UAV optimal functioning when the integral throughput value reaches its extreme at the constant value of the integral cost function being newly introduced. For the first task, conditions for the throughput constancy achieving were analyzed, and concrete condition at which fulfillment ensured this constancy was obtained. In the second task, conditions under which the integral throughput value reaches its extreme value is being determined with account for the requirements to the cost function.

It was determined that such extreme in the form of the throughput minimum manifested itself at the following conditions fulfillment: (a) the presence of the cost function in the form of the functional relationship $\sigma = \sigma(P(t))$, where σ is a mean-square deviation of the white noise, and $P(t)$ is the power of the signal being transferred, is conceded; (b) constraint of this integral function is conceded; and (c) the direct dependence between the above said indices was being ensured.

Keywords: information transmission, optimization, UAV, data throughput, wireless network.

References

1. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57894>
2. Borodin V.V., Petrakov A.M. *Trudy MAI*, 2015, no. 80. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57035>
3. Shevtsov V.A., Borodin V.V., Krylov M.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66417>
4. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69735>
5. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93398>

6. Talaev A.V., Borodin V.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91644>
7. Leonov A.V., Chaplyshkin V.A. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2015, no. 3 (143), no. 297 - 301.
8. Gurevich O.S., Kessel'man O.G., Trofimov A.S., Chernyshov V.I. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81143>
9. Slyusar V. *Elektronika: NTB*, 2010, no. 3 (101), pp. 80 - 87.
10. Slyusar V. *Elektronika: NTB*, 2010, no. 5 (103), pp. 56 – 61.
11. Samartsev N.S., Kolotilov E.D., Koshelev B.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80448>
12. Polynkin A.V., Le Kh.T. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 7, pp. 98 - 107.
13. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage, *IEEE Communications Letters*, 2016, vol. 20, no. 8, pp. 1647 - 1650. DOI: [10.1109/LCOMM.2016.2578312](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312)
14. Qiu C., Wei Z., Feng Z., Zhang P. Joint resource allocation, placement and user association of multiple UAV – mounted base stations with in – band wireless backhaul, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, vol. 8, no. 6, pp. 1575 - 1578.
15. Yin S., Zhao Y., Li L. Resource allocation and base station placement in cellular networks with wireless powered UAVs, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019, vol. 68, no. 1, pp. 1050 - 1055. DOI: [10.1109/ICC.2019.8761872](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761872)

16. Zhan P., Yu K., Swindlehurst A.L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: performance and optimization, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, vol. 47, no. 3, pp. 2068 - 2085. DOI: [10.1109/TAES.2011.5937283](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5937283)
17. Zhao W., Ammar M., Zegura E. A message ferrying approach for data delivery on sparse mobile ad hoc networks, *Proc. 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, 2004, pp. 187 - 198. URL: <https://doi.org/10.1145/989459.989483>
18. Zhan C., Zeng Y., Zhang R. Energy – efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network, *IEEE Wireless Communication Letters*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 328 - 331. DOI: [10.1109/LWC.2017.2776922](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2776922)
19. Ahmed S., Chowdhury M. Z., Jang Y.M. Energy – efficient UAV – to – user scheduling to maximize throughput in wireless networks, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 21215 - 21225.
20. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* (Differential equations and calculus of variations), Moscow, Nauka, 1973, 432 p.