

УДК 623.76

doi: 10.53816/23061456_2024_11–12_99

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗДЕРЖЕК РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГРУППЫ БПЛА

OPTIMIZATION OF THE COSTS OF THE UAV GROUP'S INTELLIGENCE ACTIVITIES

Гусейнов Омар Анар оглы

Huseynov Omar Anar ogly

Национальное аэрокосмическое агентство (г. Баку, Азербайджанская Республика)

Беспилотные разведывательные летательные аппараты в отличие от спутниковых средств разведки характеризуются ограниченностью исследуемого поля за некоторый короткий промежуток времени, что может быть скомпенсировано высокой разрешающей способностью и запуском множества БПЛА с разведывательной миссией. Такое множество БПЛА, выполняющих разведывательную миссию, составляют распределенную систему сбора информации, условия и издержки функционирования которых могут сильно отличаться друг от друга. Проанализирована функция издержек для группы БПЛА, коллективно выполняющих разведывательную миссию. Составлена и решена задача поиска оптимальной функциональной зависимости между параметром логистической функции и показателем функции вероятности, при которой дифференциальная функция суммарных издержек группы разведывательных дронов достигает минимума.

Ключевые слова: функция издержек, разведывательная миссия, логистическая функция, оптимизация, БПЛА.

Unmanned reconnaissance aircraft, unlike satellite reconnaissance vehicles, are characterized by the limitations of the field under study for a certain short period of time, which can be compensated by high resolution and the launch of many UAVs with a reconnaissance mission. Such a multitude of UAVs performing an intelligence mission constitute a distributed information collection system, the conditions and costs of which can vary greatly from each other. The cost function for a group of UAVs collectively performing a reconnaissance mission is analyzed, the problem of finding the optimal functional relationship between the parameter of the logistic function and the indicator of the probability function at which the differential function of the total costs of a group of reconnaissance drones reaches a minimum is formulated and solved.

Keywords: cost function, reconnaissance mission, logistic function, optimization, UAV.

Введение

Воздушная разведка является важнейшей деятельностью при проведении различных операций с привлечением авиасредств. Такие операции могут иметь военное, гражданское или ис-

следовательское назначение. В настоящее время в этих целях широко используются беспилотные летательные средства (БПЛА) [1–5]. Главное отличие БПЛА от спутниковых средств разведки в плане производительности состоит в ограниченности исследуемого поля за некоторый

короткий промежуток времени Δt , что может быть компенсировано высокой разрешающей способностью на поверхности земли, запуском и использованием множества БПЛА с разведывательной миссией. При этом множество БПЛА, выполняющих разведывательную миссию, составляют распределенную систему сбора информации, условия функционирования которых могут сильно отличаться друг от друга. Согласно [6], если один БПЛА не заметил какое-либо событие, плотность вероятности которого $P(t)$, то издержки из-за невыполнения миссии ECI могут быть вычислены как

$$ECI = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \text{cost}(t_2 - t_1) dt, \quad (1)$$

где $(t_2 - t_1)$ — временной интервал действия этого события;

$P(t)$ — плотность;

$\text{cost}(t_2 - t_1)$ — издержки из-за пропуска этого события.

Вместе с тем всякое опасное событие, которое может быть пропущено соответствующей аппаратурой БПЛА, может иметь случайный характер. Если допустить, что вероятность возникновения такого события равна

$$P = 1 - e^{-at}, \quad (2)$$

то функция плотности вероятности будет иметь вид

$$P(t) = ae^{-at}. \quad (3)$$

Далее, если моделировать функцию cost , следуя работам [7–10], логистической функцией, то с учетом (1) и (3) получим выражение, приведенное в работах

$$ECI = \int_{t_1}^{t_2} ae^{-at} m \left(\frac{2}{1 + e^{-k(t_2 - t)}} - 1 \right) dt. \quad (4)$$

Модель (4) содержит три основных параметра: a , k и m , где m — максимальное значение издержек события;

a — степень вероятности появления события;

k — параметр, показывающий степень (скорость) издержек события.

В целом модель (4) удовлетворительно описывает издержки из-за невыполнения миссии одним разведывательным БПЛА.

Что касается коллективного (группового) использования БПЛА в количестве n штук, то с учетом их разнесенного функционирования условия их работы могут серьезным образом отличаться. Это приводит к тому, что показатели a , m , t_2 оказываются существенно различными. В таких условиях имеет смысл осуществить поиск оптимальных связей показателей a , m , t_2 , при которых можно было бы достичь минимальной величины ECI .

Материалы и методы

В общем случае, рассматривая выражение (4) как определенный интеграл можно применить к нему следующее свойство определенного интеграла:

$$\int_{S_1}^{S_2} f(S) dS = f(S_0)(S_2 - S_1), \quad (5)$$

где S_0 — некоторая точка в интервале $(S_2 - S_1)$.

С учетом выражений (4) и (5) получим

$$ECI = ae^{-at_0} m \left(\frac{2}{1 + e^{-k(t_2 - t_0)}} - 1 \right) (t_2 - t_1), \quad (6)$$

где t_0 — некоторая точка в интервале $(t_2 - t_1)$.

Далее, приняв $\Delta t_1 = t_2 - t_1$, выражение (6) запишем как

$$ECI = ae^{-at_0} m \left(\frac{2}{1 + e^{-k(t_2 - t_0)}} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (7)$$

С учетом $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ выражение (7) запишем в компактной форме:

$$ECI = ae^{-at_0} m \left(\frac{2}{1 + e^{-k\Delta t_2}} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (8)$$

Допустим, что каждый БПЛА, входящий в группу разведывательных беспилотников, работает на отдельном участке и исходно адаптирован к условиям своего участка, тогда можно рассмотреть два множества параметров A и K , определяемые следующим образом [11–15]:

$$K\{k_i\}; \quad i = \overline{1, n}; \quad (9)$$

$$\text{где} \quad k_i = k_{i-1} + \Delta k; \quad \Delta k = \text{const}; \quad k_0 = 0; \quad (10)$$

$$A = \{a_j\}; \quad j = \overline{1, n}; \quad (11)$$

$$a_j = a_{j-1} + \Delta a; \quad \Delta a = \text{const}; \quad a_0 = 0. \quad (12)$$

С учетом выражения (8) для всей группы БПЛА в количестве n штук суммарную величину ECI определим следующим образом:

$$ECI_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n a_i e^{a_i t_0} m \left(\frac{2}{1 + e^{-k_i \Delta t_2}} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (13)$$

Для поиска оптимального соотношения между k и a имеет смысл использовать не интегральную величину ECI , определяемую по выражению (4), а дифференциальное представление ECI , которое применительно к выражению (12) получим путем сближения t_2 к значению t_0 . В этом случае, приняв

$$a \Delta t_2 \ll 1, \quad (14)$$

получим

$$e^{-k \Delta t_2} = 1 - k \Delta t_2. \quad (15)$$

С учетом выражений (12) и (14) запишем

$$ECI_{\Sigma, d} = \sum_{i=1}^n a_i e^{-a_i t_0} m \left(\frac{2}{2 - k_i \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1. \quad (16)$$

Далее введем в рассмотрение функцию связи

$$k_i = k_i(a_i) \quad (17)$$

и запишем выражение (16) в непрерывной форме:

$$ECI_{in, d} = \int_0^{a \max} a e^{-at_0} m \left(\frac{2}{2 - k(a) \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1 da. \quad (18)$$

Для поиска и определения оптимальной функции $k(a)$ есть, следующее интегральное ограничительное условие:

$$\int_0^{a \max} k(a) da = C_1; \quad C_1 = \text{const}. \quad (19)$$

С учетом выражений (18) и (19) составим целевой функционал F_0 безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \int_0^{a \max} a e^{-at_0} m \left(\frac{2}{2 - k(a) \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1 - \lambda \left[\int_0^{a \max} k(a) da - C_1 \right], \quad (20)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решение задачи (20) согласно [11] удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{d \left\{ e^{-at_0} m \left(\frac{2}{2 - k(a) \Delta t_2} - 1 \right) \Delta t_1 - \lambda k(a) \right\}}{dk(a)} = 0. \quad (21)$$

Из условия (21) получим

$$2a e^{-at_0} m \left(\frac{2 \Delta t_2}{[2 - k(a) \Delta t_2]^2} - 1 \right) \Delta t_1 - \lambda = 0. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим

$$\left(\frac{2 \Delta t_2}{[2 - k(a) \Delta t_2]^2} - 1 \right) = - \frac{\lambda}{2a e^{-at_0} m \Delta t_1}. \quad (23)$$

Из выражения (23) получим

$$\frac{2 \Delta t_2}{[2 - k(a) \Delta t_2]^2} = 1 + \frac{\lambda}{2a e^{-at_0} m \Delta t_1}. \quad (24)$$

Из выражения (24) находим

$$k(a) = \frac{2 \Delta t_2}{\Delta t_0 \left(1 + \frac{\lambda}{2a e^{-at_0} m \Delta t_1} \right)} - \frac{2}{\Delta t_0}. \quad (25)$$

При решении выражения (25) функционал (20) достигает минимума, так как производная выражения (22) по искомой функции оказывается всегда положительной величиной. Для вычисления множителя λ можно воспользоваться выражениями (25) и (19). Данное вычисление здесь не приводится.

Обсуждение

На базе результатов функции издержек из-за невыполнения миссии одним разведывательным БПЛА проанализирована аналогичная функция для группы БПЛА, коллективно выполняющих разведывательную миссию. Отмечается, что условия функционирования членов группы БПЛА могут быть существенно различными. Составлена и решена задача поиска оптимальной функциональной зависимости между k (параметром логистической функции) и a (показателем функции вероятности), при которой дифференциальная функция суммарных издержек группы разведывательных дронов достигает минимума.

Заключение

Разработана методика вычисления суммарной функции издержек при невыполнении миссии со стороны группы разведывательных дронов.

С учетом различных условий функционирования группы дронов на обширной местности, и как следствие различных условий функционирования, определена оптимальная функциональная связь между k и a , при которой суммарная функция издержек в дифференциальном вычислении достигает минимума.

Список источников

1. Nguyen M.T., Nguyen C.V., Truong L.H. et al. Electromagnetic field based WPT technologies for UAVs: a comprehensive survey // *Electronics*. 2020. Vol. 9. No. 3. 461 p.
2. Truong L.H., Quyen T.V., Nguyen C.V., Nguyen M.T. wireless power transfer near-field technologies for unmanned aerial vehicles (UAVs): a review // *EAI Endorsed transactions on industrial networks and intelligent systems*. 2020. Vol. 7. No 22.
3. Nguyen H.T., Nguyen M.T., Do H.T., Hua T., Nguyen C.V. DRL-based intelligent resource allocation for diverse QoS in 5G and toward 6G vehicular networks: a comprehensive survey // *Wireless communications and mobile computing*. Vol. 2021.
4. Xu C., Liao X., Tan J., Ye H., Lu H. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation on policies and technologies in urban low altitude // *IEEE access*. 2020. Vol. 8. Pp. 74175–74194.
5. Liu J., Li H. Artificial potential function safety and obstacle avoidance guidance for autonomous rendezvous and docking with noncooperative target // *Mathematical problems in engineering*. Vol. 2019.
6. Freed M., Harris R., Shafto M. Comparing methods for UAV-based autonomous surveillance// 2004 National conference on artificial intelligence. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040068395/downloads/20040068395.pdf>. (дата обращения: 27.06.2024).
7. Freed M., Harris R., Shafto M.G. Human vs autonomous control of UAV surveillance URL: https://www.researchgate.net/publication/229091495_Human_vs_Autonomous_Control_of_UAV_S. (дата обращения: 27.06.2024).
8. Engblom J., Solakivi T., Toyli J., Ojala L. Multiple-method analysis of logistics costs // *Int. J. production economics* 137. 2012. Pp. 29–35.
9. Minken H., Johansen B.G. A logistic cost function with explicit transport costs // *Economics of transportation* 19. 2019.
10. Zaidi A., Saleh A., Luhayb M. Two statistical approaches to justify the use of the logistic function in binary logistic regression // *Mathematical problems in engineering*. Vol. 2023.
11. Абдулов Р.Н., Абдуллаев Н.А., Асадов Х.Г. Вопросы оптимизации применения беспилотных летательных аппаратов для поиска и слежения объектов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 1 (83). С. 45–49.
12. Мамедов И.Э., Сулейманов Т.И., Исмаилов К.Х., Асадов Х.Г. Развитие метода киберфизической оптимизации функционирования разведывательных беспилотных летательных аппаратов // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2018. № 4 (42). С. 77–79.
13. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2015. 444 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
14. Молоденков С.А., Пашкин М.С. Анализ современных беспилотных летательных аппаратов // *Современные научные исследования и инновации*. 2023. № 9 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/09/100804> (дата обращения: 01.12.2024).

15. Бугаков И.А., Сорокин А.Д., Хомяков А.В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника // Известия Института инженерной физики. 2019 № 1(51). С. 65–68.

References

1. Nguyen M.T., Nguyen C.V., Truong L.H. et al. Electromagnetic field based WPT technologies for UAVs: a comprehensive survey // Electronics. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 461.

2. Truong L.H., Quyen T.V., Nguyen C.V., Nguyen M.T. wireless power transfer near-field technologies for unmanned aerial vehicles (UAVs): a review // EAI Endorsed transactions on industrial networks and intelligent systems. 2020. Vol. 7. No 22.

3. Nguyen H.T., Nguyen M.T., Do H.T., Hua T., Nguyen C. V. DRL-based intelligent resource allocation for diverse QoS in 5G and toward 6G vehicular networks: a comprehensive survey // Wireless communications and mobile computing. Vol. 2021.

4. Xu C., Liao X., Tan J., Ye H., Lu H. Recent research progress of unmanned aerial vehicle regulation policies and technologies in urban low altitude // IEEE access. 2020. Vol. 8. Pp. 74175–74194.

5. Liu J., Li H. Artificial potential function safety and obstacle avoidance guidance for autonomous rendezvous and docking with noncooperative target // Mathematical problems in engineering. Vol. 2019.

6. Freed M., Harris R., Shafto M. Comparing methods for UAV-based autonomous surveillance// 2004 National conference on artificial intelligence. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040068395/downloads/20040068395.pdf>. (date of reference: 01.12.2024)

7. Freed M., Harris R., Shafto M. G. Human vs autonomous control of UAV surveillance // <https://>

www.researchgate.net/publication/229091495_Human_vs_Autonomous_Control_of_UAV_S. (date of reference: 01.12.2024).

8. Engblom J., Solakivi T., Toyli J., Ojala L. Multiple-method analysis of logistics costs // Int. J. production economics 137. 2012. Pp. 29–35.

9. Minken H., Johansen B. G. A logistic cost function with explicit transport costs // Economics of transportation. 19. 2019.

10. Zaidi A., Saleh A., Luhayb M. Two statistical approaches to justify the use of the logistic function in binary logistic regression // Mathematical problems in engineering. Vol. 2023.

11. Abdulov R.N., Abdullaev N.A., Asadov H.G. Issues of optimization of the use of unmanned aerial vehicles for search and tracking of objects // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2013. № 1(83). Pp. 45–49.

12. Mamedov I.E., Suleymanov T.I., Ismailov K.H., Asadov H.G. Development of the method of cyberphysical optimization of reconnaissance unmanned aerial vehicles // Bulletin of S.A. Lavochkin NPO. 2018. № 4(42). Pp. 77–79.

13. Moiseev V.S. Fundamentals of the theory of effective application of unmanned aerial vehicles: a monograph. Kazan: Editorial and Publishing Center «Shkola», 2015. 444 p. (Series «Modern Applied Mathematics and Informatics»).

14. Molodenkov S.A., Pashkin M.S. Analysis of modern drones // Modern scientific research and innovations. 2023. № 9 [Electronic resource]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/09/100804> (date of reference: 01.12.2024).

15. Bugakov I.A., Sorokin A.D., Khomyakov A.V. Efficiency indicators of the use of a group of unmanned aerial vehicles when solving the task of aerial reconnaissance in the conditions of enemy countermeasures // Izvestia Institute of Engineering Physics. 2019. № 1(51). Pp. 65–68.