

Д.В. Карлов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ ЗЙОМОЧНОЇ АПАРАТУРИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОПЕРАЦІЙ

У статті проведено аналіз факторів, які впливають на можливість вирішення розвідувальних задач у повному обсязі. Розроблена методика рішення задачі вибору БПЛА і знімальної апаратури за визначеними критеріями на підставі методу адитивної згортки критеріїв, яка має на увазі визначення коефіцієнтів відносно важливості кожного з критеріїв вибору та їх нормалізації, тобто приведення критеріїв до єдиного (безрозмірного) масштабу виміру. Вибір кращого варіанту відбувається на основі інтегральної оцінки кожної складової системи.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, просторові координати об'єкта, характеристики знімальної апаратури, задачі розвідки, багатокритеріальна оптимізація.

Вступ

Постановка проблеми. Рішення розвідувальних задач таких як виявлення та ідентифікація наземних, водних та повітряних цілей, угруповань військ та техніки, вогневих точок та фортифікаційних споруд; побудова картографічних моделей обумовлюють необхідність застосування різноманітних джерел надходження інформації щодо районів інтересу та висуває жорсткі вимоги по достовірності, оперативності і якості вхідних даних [1]. Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє розглядати їх як альтернативне джерело інформації до традиційних космо- та аеро- знімків у порівнянні з іншими літальними апаратами є [2, 3]. Переваги і специфічні якості комплексів з БПЛА зумовлюють їх роль як високомобільного компонента Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил (ЗС) України, здатного в короткі терміни не лише збирати достовірну розвідувальну інформацію про супротивника на великій території, але й надавати цільові завдання для високоточної зброї та авіації [4].

Аналіз останніх досліджень. Можливість вирішення розвідувальних задач з використанням даних отриманих з БПЛА залежить як від характеристик самого літального апарата таких як тривалість, висота, швидкість польоту, допустимих масо-габаритних характеристик корисного навантаження, навігаційного забезпечення, так від характеристик зйомочної апаратури розташованої на його борту та точності визначення елементів зовнішнього орієнтування на момент зйомки [5; 6]. Різноманітність БПЛА за призначенням, тактико-технічними можливостями, характеристиками розташованої на ньому знімальної апаратури, вартості і т. д. значно ускладнило рішення задач їх порівняльної оцінки і вибору оптимальних зразків [7–8]. Аналіз робіт в даній області показав, що на сьогоднішній день ураховується лише тактико-технічні характеристики літального апарату та наявність на борту необхідної знімальної апаратури [9–10]. Помилкові рішення, що

виникають при створенні, виборі та закупівлі окремих апаратів призводять до неможливості використання БПЛА для вирішення поставленої розвідувальної задачі у повному обсязі. **Мета статті** – визначення факторів, які впливають на можливість вирішення поставленої задачі у повному обсязі, та формуванні критеріїв прийняття рішення про найбільш ефективний тип БПЛА і його корисне навантаження для проведення розвідки у районі бойових дій.

Виклад основного матеріалу

Для визначення критеріїв вибору типу БПЛА та складу його корисного навантаження при вирішенні розвідувальних задач проаналізуємо залежності характеристик отриманих даних від параметрів знімальної апаратури та умов зйомки. Для цього використовуємо формули переходу від просторових координат точки об'єкту до координат цієї точки на знімку [11]:

$$\begin{cases} x_{zn} = -f \frac{a_1 \cdot (X - X_s) + b_1 \cdot (Y - Y_s) + c_1 \cdot (Z - Z_s)}{a_3 \cdot (X - X_s) + b_3 \cdot (Y - Y_s) + c_3 \cdot (Z - Z_s)}; \\ y_{zn} = -f \frac{a_2 \cdot (X - X_s) + b_2 \cdot (Y - Y_s) + c_2 \cdot (Z - Z_s)}{a_3 \cdot (X - X_s) + b_3 \cdot (Y - Y_s) + c_3 \cdot (Z - Z_s)}, \end{cases}$$

де f – фокусна відстань знімальної апаратури; X, Y, Z – просторові координати точки об'єкта; X_s, Y_s, Z_s – просторові координати знімальної апаратури; x_{zn}, y_{zn} – площинні координати точки на знімку; $x_{zn} = (x - x_0) \cdot \delta x$; $y_{zn} = (y - y_0) \cdot \delta y$; x, y – екранні координати точки на знімку; x_0, y_0 – координати центру знімка; $\delta x, \delta y$ – розміри чарунки ПЗС-матриці; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ – направляючі косинуси фотоапарата на момент зйомки [11].

Залежність розподільчої здатності на знімку від висоти зйомки без перспективних спотворень приведено на рис. 1, а та при їх наявності на рис. 1, б. Розрахунки проводились для фокусної відстані фотоапарату

65 мм. Як видно з приведених графіків, наявність кутів крену та тангажа в момент зйомки призводить до значного погіршення розподільчої здатності. Крім того, при виборі знімальної апаратури, необхідно звертати увагу не лише на значення фокусної відстані та розмірів ПЗС-матриці, але й на розміри ПЗС-ячейки цієї матриці.

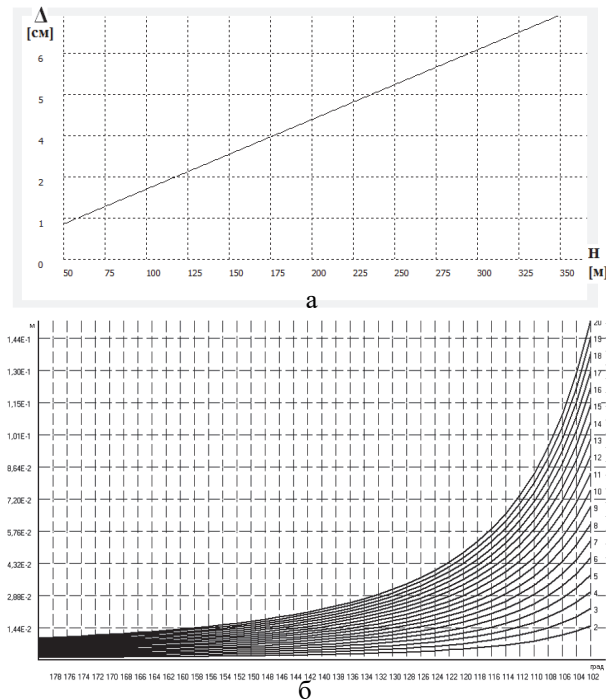


Рис. 1. Залежність розподільчої здатності на знімку від висоти польоту: а – при відсутності перспективних спотворень; б – при наявності перспективних спотворень

При вирішенні задачі спостереження за заданою територією з використанням БПЛА виникають протиріччя між необхідністю контролю великої території та забезпечення розподільчої здатності на знімку достатньої для виявлення об'єктів розвідки. Технічним рішенням для усунення цього протиріччя є або проведення перспективної зйомки, або використання ширококутних об'єктивів. Однак перспективна зйомка, як було вказано вище, приводить до перспективних спотворень, а використання ширококутних фотоапаратів – до посилення ефекту дисторсії на знімку (рис. 2).

При вирішенні задачі пошуку наземних замаскованих об'єктів, окрім забезпечення необхідної розподільчої здатності на знімку необхідно приділити увагу радіометричній та спектральній чутливості знімальної апаратури. Вимоги до цих характеристик можуть бути сформовані на підставі сумісного аналізу спектральних характеристик об'єкта та фона.

Задачі визначення топографічних характеристик об'єктів по знімкам, які отримані з БПЛА, передбачають високі вимоги визначення елементів зовнішнього орієнтування знімальної апаратури на момент зйомки. Треба враховувати, що процес зйомки з БПЛА супроводжується впливом стохастичного збурення, викликаного щільними шарами атмосфери. Отже точність визначення топографічних характеристик об'єктів залежить не

тільки від взаємного розташування об'єкта та знімальної апаратури, а й точності визначення її просторових координат та кутів зйомки, можливості синхронізувати момент зйомки і момент визначення елементів зовнішнього орієнтування, аеродинамічних характеристик БПЛА, наявність або відсутність геростабілізуючої платформи для знімальної апаратури. Методика розрахунку потенційної точності визначення просторових координат точок об'єкта з урахуванням вище перелічених факторів приведена у [12].



Рис. 2. Ефект дисторсії при використанні

При побудові ортофотоплана на підставі комбінування декількох знімків, окрім вище перелічених факторів слід враховувати наявність на знімках ефекту зсуву контурів об'єкта за рахунок його висоти. Отже зйомка повинна проводитись у надір, без перспективних спотворень, частота отримання серії знімків повинна забезпечити 50% їх перекриття.

Методика рішення задачі вибору БПЛА і знімальної апаратури. Аналіз факторів, які впливають на можливість вирішення розвідувальних задач показав, що при виборі знімальної апаратури треба враховувати такі параметри як: розміри ПЗС – матриці та ПЗС – елементу, фокусна відстань, кут огляду, радіометрична та спектральна чутливість та частота фотографування, крім того необхідно враховувати точності характеристики навігаційного обладнання, датчиків визначення кутів курсу, крену та тангажу, швидкість, висоту та час польоту, маневреність БПЛА, можливість розташування знімальної апаратури, точність позиціонування в момент зйомки. На відміну від завдань оптимізації з одним критерієм в багатокритеріальній оптимізації є невизначеність цілей. Існування рішення, яке максимізує кілька цільових функцій, є рідкісним винятком, тому з математичної точки зору завдання багатокритеріальної оптимізації є невизначеними і рішенням може бути тільки компромісним. Методика вибору типу та складу корисного навантаження безпілотних літальних апаратів була розроблена на підставі методу адитивної згортки критеріїв, який має на увазі визначення коефіцієнтів відносно важливості кожного з критеріїв вибору та їх нормалізації, тобто приведення критеріїв до єдиного (безрозмірного) масштабом виміру. Для розрахунку було прийня-

то, що максимальна оцінка важливості кожного критерію дорівнює 10 балам. На основі важливості критеріїв і кількісної їх оцінки виробляється визначення агрегованих значень варіантів рішень як суми творів оцінок, отриманих по погоджених кількісних шкалах, і коефіцієнтів відносної важливості (вагам) кожного з критеріїв. Вибір кращого варіанту відбувається на основі інтегральної оцінки кожної складової системи.

Висновки

Різноманітність БПЛА значно ускладнило рішення задач їх порівняльної оцінки і вибору оптимальних зразків. Для визначення критеріїв вибору типу БПЛА та складу його корисного навантаження при вирішенні розвідувальних задач було проаналізовано залежності характеристик отриманих даних від параметрів знімальної апаратури та умов зйомки. В результаті були визначені такі критерії вибору: розміри ПЗС – матриці та

ПЗС - елементу, фокусна відстань, кут огляду, радіометрична та спектральна чутливість та частота фотографування для знімальної апаратури та точності характеристики навігаційного обладнання, датчиків визначення кутів курсу, крену та тангажу, швидкість, висоту та час польоту, маневреність БПЛА, можливість розташування знімальної апаратури, точність позиціонування в момент зйомки. У зв'язку з тим, що при вирішенні різних груп задач розвідки висуваються різні вимоги до проаналізованих критеріїв, а іноді ці вимоги суперечать один одному було прийнято рішення визначити коефіцієнти відносної важливості кожного з критеріїв вибору для кожної розвідувальної задачі. Побудова погоджених кількісних шкал для кожного з критеріїв, що дозволяють перейти від різних форм їх подання (кількісною, якісною) і одиниць виміру до єдиної шкали. Вибір кращого варіанту відбувається на основі інтегральної оцінки кожної складової.

Список літератури

1. Haddal Ch.C. Homeland Security: Unmanned Aerial Vehicles and Border Surveillance: CRS Report for Congress [Electronic resource] / Ch.C. Haddal, J. Gertler. – Congressional Research Service, 2010. – 7 p., available at: <https://bitly.su/Iah3CKKO>.
2. Мосов С.П. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития: монография / С.П. Мосов. – К.: Изд. дом “Румб”, 2008. – 160 с.
3. Егоров К. Беспилотные авиационные комплексы в вооружённых конфликтах / К. Егоров, С. Смирнов // Военный парад. июль-август, 2005. – С. 34-35.
4. UAV Command and Control, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems [Electronic resource] / N. Hosseini, H. Jamal, D.W. Matolak, J. Haque, T. Magesacher // IEEE Aerospace Conference, 2-9 March 2019. – Montana: Big Sky, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8741719>.
5. Chen J. The study of UAV intelligent support mode based on battlefield networks [Electronic resource] / J. Chen, T. Ma, Ch. Su // IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC'2017), 25-26 March 2017. – Chongqing, China, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8054346>.
6. Baek H. Design of Future UAV-Relay Tactical Data Link for Reliable UAV Control and Situational Awareness [Electronic resource] / H. Baek, J. Lim // IEEE Communications Magazine. – 2018. – № 56(10). – P. 144-150, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8493134>.
7. An approach of uav flight state estimation and prediction based on telemetry data [Electronic resource] / B. Wang, Ya. Xu, D. Liu, X. Peng, W. Wang // Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin'2017), 9-12 July 2017. – Harbin, China, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8079256>.
8. Novel Architecture for Multipurpose Reconfigurable Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Concept, Design and Prototype Manufacturing data [Electronic resource] / M.A. Ferreira, G.C. Lopes, E.L. Colombini, A. Simoes // Latin American Robotic Symposium (SBR'2018) and Workshop on Robotics in Education (WRE'2018), 6-10 Nov. 2018. – Joao Pessoa, Brazil, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8588591>
9. UAV-Based Oblique Photogrammetry for Outdoor Data Acquisition and Offsite Visual Inspection of Transmission Line [Electronic resource] / S. Jiang, W. Jiang, W. Huang, L. Yang // Remote Sens. – 2017. – № 9. – 25 p., available at: <https://bitly.su/T8RSWK>.
10. O'Connor J. Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: optimizing image data [Electronic resource] / J. O'Connor, M. Smith, M.R. James. – 2017. – 42 p., available at: https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/88309/2/PiPG_paper_no_TCs.pdf.
11. Лебедев Д.В. Навигация и управление ориентацией малых космических аппаратов / Д.В. Лебедев. – К.: Наукова думка, 2006. – 298 с.
12. Березина С.И. Получение пространственных координат объекта с использованием данных беспилотных летательных аппаратов / С.И. Березина // Системи обробки інформації. – 2013. – № 4(111). – С. 12-19.

References

1. Haddal, Ch.C. and Gertler, J. (2010), *Homeland Security: Unmanned Aerial Vehicles and Border Surveillance: CRS Report for Congress*, Congressional Research Service, 7 p., available at: www.bitly.su/Iah3CKKO (accessed 12 September 2019).
2. Mosov, S.P. (2008), “*Bespilotnaya razvedyvatel'naya aviatsiya stran mira: istoriya sozdaniya, opyt boyevogo primeneniya, sovremennoye sostoyaniye, perspektivy razvitiya*” [*Unmanned reconnaissance aircraft of the countries of the world: history of creation, combat experience, current status, development prospects*], Izd. dom “Rumb”, Kyiv, 160 p.
3. Yegorov, K. and Smirnov, S. (2005), *Bespilotnyye aviatsionnyye komplekсы v vooruzhennykh konfliktakh* [Unmanned aerial systems in armed conflicts], *Military Parade*, pp. 34-35.
4. Hosseini, N., Jamal, H., Matolak, D.W., Haque, J., and Magesacher, T. (2019), UAV Command and Control, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems, *IEEE Aerospace Conference*, 2-9 March 2019, Big Sky, Montana, USA, available at: www.ieeexplore.ieee.org/document/8741719 (accessed 3 September 2019).
5. Chen, J., Ma, T., and Su, Ch. (2017), The study of UAV intelligent support mode based on battlefield networks, *IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC'2017)*, Chongqing, China, available at: www.ieeexplore.ieee.org/document/8054346 (accessed 3 September 2019).

6. Baek, H. and Lim, J. (2018), Design of Future UAV-Relay Tactical Data Link for Reliable UAV Control and Situational Awareness, *IEEE Communications Magazine*, No. 56(10), pp. 144-150, available at: www.ieeeexplore.ieee.org/document/8493134 (accessed 3 September 2019).

7. Wang, B., Xu, Ya., Liu, D., Peng, X., and Wenjuan, W. (2017), An approach of uav flight state estimation and prediction based on telemetry data, *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin'2017)*, Harbin, China, available at: www.ieeeexplore.ieee.org/document/8079256 (accessed 3 September 2019).

8. Ferreira, M.A., Lopes, G.C., Colombini, E.L., and Simoes, A. (2018), A Novel Architecture for Multipurpose Reconfigurable Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Concept, Design and Prototype Manufacturing data, *Latin American Robotic Symposium (SBR'2018) and Workshop on Robotics in Education (WRE'2018)*, Joao Pessoa, Brazil, available at: www.ieeeexplore.ieee.org/document/8588591 (accessed 3 September 2019).

9. Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., and Yang, L. (2017), UAV-Based Oblique Photogrammetry for Outdoor Data Acquisition and Offsite Visual Inspection of Transmission Line, *Remote Sens.*, No. 9, 25 p., available at: www.bitly.su/T8RSWK (accessed 3 September 2019).

10. O'Connor, J. and Smith, M. (2017), Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: optimizing image data, 42 p., available at: www.eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/88309/2/PiPG_paper_no_TCs.pdf (accessed 3 September 2019).

11. Lebedev, D.V. (2006), "Навигация и управление ориентированной аппаратурой" [*Navigation and orientation control of small spacecraft*], Naukova dumka, Kyiv, 298 p.

12. Berezina, S.I. (2013), "Получение пространственных координат объекта с использованием данных беспилотных летательных аппаратов" [Obtaining the spatial coordinates of an object using data from unmanned aerial vehicles], *Information Processing Systems*, No. 4(111), pp. 12-19.

Надійшла до редколегії 14.05.2019

Схвалена до друку 18.06.2019

Відомості про автора:

Карлов Дмитро Володимирович

доктор технічних наук старший науковий співробітник
заступник начальника наукового центру
Повітряних Сил з наукової роботи
Харківського Національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3786-2160>

Information about the author:

Dmytro Karlov

Doctor of Technical Sciences Senior Research Fellow
Deputy Chief of the Scientific Center
of the Air Force in Science
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3786-2160>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ

Д.В. Карлов

В статье проведен анализ факторов, влияющих на возможность решения разведывательных задач в полном объеме. Разработана методика решения задачи выбора БПЛА и съемочной аппаратуры по определенным критериям на основании метода аддитивной свертки критериев, которая подразумевает определение коэффициентов относительной важности каждого из критериев выбора и их нормализации, то есть приведения критериев к одному (безразмерному) масштабу измерения. Выбор лучшего варианта происходит на основе интегральной оценки каждой составляющей системы.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, пространственные координаты объекта, характеристики съемочной аппаратуры, задачи разведки, многокритериальная оптимизация.

DETERMINATION OF CRITERIA FOR SELECTION OF SURVEYING EQUIPMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR INFORMATION SUPPORT OF MILITARY CAMPAIGNS

D. Karlov

The ability to solve reconnaissance tasks using data obtained from UAVs depends upon the characteristics of the aircraft itself and the characteristics of the onboard surveying equipment. The variety of UAVs from the point of view of their purpose, operational capabilities, characteristics of the onboard surveying equipment, cost, etc. made it difficult to solve the problem of their comparative assessment and selection of optimal samples. The goal of the article is to determine the factors that influence the ability to solve the problem in full, and to formulate the decision-making criteria on the most efficient type of UAV and its payload for survey in the battlefield. To determine the criteria for selection of UAV type and payload at solving the task of surveying, the dependence of the characteristics of the obtained data on the parameters of the surveying equipment and sensing conditions was analyzed. As a result, the following selection criteria were defined: the sizes of CCD-array and CCD-element, focal length, viewing angle, radiometric and spectral sensitivity and frequency of taking photos for survey equipment and positioning accuracy at the moment of photography, speed, altitude and flight time of the UAV, its maneuverability, possibility of onboard survey equipment location. The method for selection of the type and composition of unmanned aerial vehicles payload was developed on the basis of the method of additive convolution of criteria. It involves determination of the coefficients of relative importance of each of the selection criteria and their normalization, that is, bringing the criteria to a single (dimensionless) scale. On the basis of the importance of the criteria and their quantitative evaluation, the aggregate values of the decisions variants are determined as the sum of the products of the estimates obtained over the agreed quantitative scales and the coefficients of the relative importance (weights) of each of the criteria. The best variant is selected on the basis of the integral evaluation of each component of the system.

Keywords: unmanned aerial vehicle, spatial coordinates of the object, characteristics of survey equipment, reconnaissance tasks, multicriteria optimization.