



УДК 629.7

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ БПЛА, ОСНАЩЕННОГО ФОТОКАМЕРОЙ, В РЕЖИМЕ ПОЛЕТА С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ

Г. В. Алиева¹, О. А. Гусейнов¹¹Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена вопросам оптимизации режима работы беспилотного летательного аппарата (БПЛА), оснащенной фотокамерой. Сформулирована и решена задача минимизации суммарного смаза изображений, формируемых камерой, установленной на БПЛА, осуществляющего непрерывный полет над различиями сельскохозяйственными полями, в которых выращивается разнообразная сельхозпродукция. Рассмотрен динамический режим полета БПЛА, в котором скорость полета увеличивается непрерывно от минимума до максимума. При таком динамическом режиме полета требуется определить маршрут прохождения полей, в которых показатель GSD (*ground sampling distance*) составляет некоторое множество. При наличии некоторого ограничения на суммарную величину имеющихся GSD , характерного для конкретного сезона развития растительности, вычислена требуемая функциональная зависимость $GSD = \varphi(F_v)_{opt}$ при которой может быть достигнут минимальный среднесуммарный смаз получаемых изображений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: БПЛА, СМАЗ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ, СКОРОСТЬ ПОЛЕТА, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ.

<https://elibrary.ru/ulazen>

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время БПЛА широко используется для проведения дистанционного зондирования, что объясняется возможностью достижения пространственного разрешения на уровне миллиметра [Lelong et al., 2008; Torres-Sanchez et al., 2014; Liu et al., 2017]. Необходимость в таком высоком пространственном разрешении возникает в зависимости от решаемой задачи. Например, при решении сельскохозяйственных задач пространственное разрешение на уровне 10 см считается вполне достаточным для определения значения индекса листовой площади (LAI) [Liebisch et al., 2015; Maimaitijiang et al., 2017], в то время как для оценки биомассы растений требуется пространственное разрешение на уровне 2 см [Holman et al., 2016; Roth and Streit, 2018], а для наблюдения за процессом роста растений необходимо разрешение на уровне 1 см÷1 мм [Roth et al., 2018a; Chen et al., 2017; Jin et al., 2017].

Решение вышеуказанных задач, естественно, не ограничивается путем установки на БПЛА высококачественной камеры и осуществлением низко высотного полета.

В работах [Liebisch et al., 2015; Roth et al., 2018a; Jin et al., 2017] были рассмотрены вопросы оптимального выбора скорости полета БПЛА в режиме дистанционного зондирования. В работах

Электронная почта авторов для переписки:

Алиева Амида Джабраиль гызы, e-mail: amidec.b@mail.com



<https://elibrary.ru/ulazen>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

[Lelong et al., 2008; Geipel et al., 2014] рассматривалась задача оптимального выбора скорости затвора и диафрагмы. В работе [Roth et al., 2018b] был проанализирован вопрос о возникновении искажений из-за движения БПЛА. Вместе с тем, вопрос об адаптивном выборе маршрута прохождения зондируемых растительных полей с различной величиной GSD для обеспечения минимальной величины среднесуммарного смаза в ходе одного полета с непрерывно изменяющейся скоростью до сих пор не рассматривался. Потребность в таком полете в адаптивном режиме возникает при проведении контроля над несколькими сельскохозяйственными полями, в которых выращивается различная продукция.

Таким образом, целью настоящего исследования является определение оптимального выбора маршрута полета БПЛА с учетом данных зондируемых растительных полей с различной величиной GSD в режиме непрерывно изменяемой скорости полета, при которой среднесуммарная величина смаза достигает минимальной величины.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предварительно рассмотрим некоторые базовые понятия, характерные для проведения дистанционного зондирования с применением БПЛА, оснащенного камерой высокого разрешения.

Существует определенный предел разрешения человеческого глаза C , определяемый как размер объекта воспринимаемого глазом как неделимая точка (предел разрешения глаза).

В целом камеру можно представить как устройство, состоящее из диафрагмы, линзы и сенсора (матрицы фоточувствительных элементов (рис. 1).

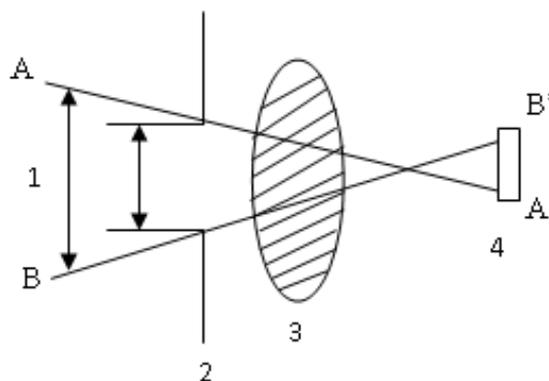


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема камеры. Цифрами обозначены: 1-объект, размером AB ; 2-диафрагма; 3-линза; 4-сенсор

Гиперфокальное расстояние линзы H определяется как:

$$H = \frac{f^2}{Nc} + f, \quad (1)$$

где f -фокусное расстояние; N -размер диафрагмы. При этом, должно быть обеспечено соотношение:

$$d > c, \quad (2)$$

где d -дифракционный предел, определяемый как:

$$d = 2 \cdot 1,22 \cdot \lambda \cdot N, \quad (3)$$

где λ -длина волны.

На формируемом изображении предел разрешения глаза можно выбрать равным размеру пиксела (рис. 2).

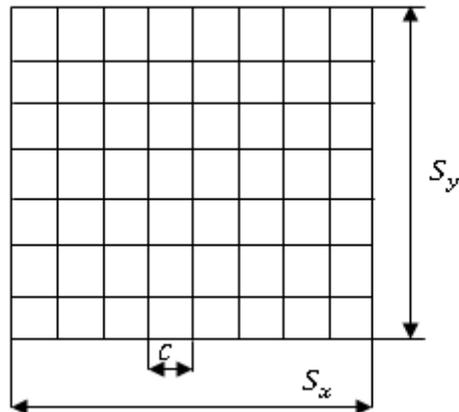


Рис. 2. Показатели формируемого изображения: Условные обозначения: S_x, S_y -размеры сенсора (изображения); C -размер пикселя, равный пределу разрешения глаза

При этом:

$$\frac{S_x}{n_x} = \frac{S_y}{n_y}, \quad (4)$$

где n_x, n_y -количество решеткируемых пикселов по координатам x и y .

Применительно к наземному исследуемому объекту важной характеристикой является размер пиксела на исследуемом объекте, или расстояние между исследуемыми точками, GSD , определяемое как показано на рисунке 3.

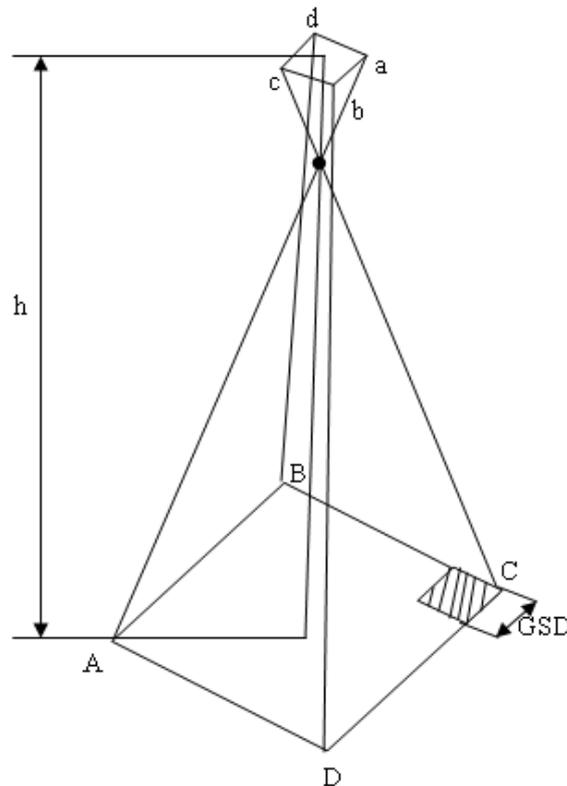


Рис. 3. Определение расстояния между исследуемыми точками на объекте (GSD). h -высота полета; $ABCD$ -площадь наземного исследуемого объекта; $abcd$ -формируемое изображение

Согласно [Roth et al., 2018b]:

$$GSD = \frac{G_x}{n_x} = \frac{G_y}{n_y}, \quad (5)$$

где:

$$G_x = S_x \cdot \frac{h}{f}, \quad (6)$$

$$G_y = S_y \cdot \frac{h}{f}. \quad (7)$$

Важнейшим показателем формирования изображений в ходе полета БПЛА, оборудованного камерой, является смаз изображений из-за перемещения камеры относительно исследуемого объекта. Согласно [Roth et al., 2018b] существует следующее соотношение между скоростью полета F_v , GSD , скоростью затвора I_t и величиной смаза δ :

$$F_v = \frac{GSD \cdot \delta}{I_t}. \quad (8)$$

Суть выше заявленного адаптивного режима функционирования БПЛА, оборудованного камерой, заключается во введении режима адаптивно изменяемой скорости, в зависимости от размера исследуемых объектов на поле (т.е. наземных пикселей).

Из выражения (8) получим:

$$\delta = \frac{F_v I_t}{GSD}. \quad (9)$$

Введем в рассмотрение некоторое множество M сельскохозяйственных полей, в которых величина GSD различна из-за различий размеров продукции, выращиваемых на этих полях:

$$M = \{GSD_i\} \quad i = (\overline{1, m}). \quad (10)$$

Соответственно (10) при пролете над указанными полями следует выбрать скорость полета $F_{vj}; j = (\overline{1, m})$ где F_j является элементом некоторого упорядоченного множества L , где:

$$L = \{F_{vj}\}. \quad (11)$$

С учетом дискретных множеств (10) и (11) введем в рассмотрение функциональную зависимость:

$$GSD_i = \varphi(F_{vj}). \quad (12)$$

С учетом (8) и (12) получим:

$$\delta_{ij} = \frac{F_{vj} I_t}{GSD_i} = \frac{F_{vj} I_t}{\varphi(F_{vj})}. \quad (13)$$

Среднюю величину смаза определим как:

$$\delta_{cp} = \sum_{i,j=1}^m \frac{F_{vj} I_t}{\varphi(F_{vj})}. \quad (14)$$

Для определения оптимального вида функции $\varphi(F_{vj})$ введем некоторое ограничение на суммарное значение величин GSD_i :

$$\sum_{i,j=1}^m GSD_i = C_1. \quad (15)$$

Физический смысл условия (15) вполне понятен, т.к. в некотором субъекте сельскохозяйственного производства C_1 всегда является фиксированной величиной в течение одного сезона производства сельхозрастений.

Для определения оптимального вида зависимости $\varphi(F)_{opt}$ осуществим условный переход от дискретных моделей (13) и (14) к непрерывным моделям, т.е. взамен модели (14) будем рассматривать функционал:

$$\delta_{ср.н.} = \frac{1}{F_{vmax}} \int_0^{F_{vmax}} \frac{F_v I_t}{\varphi(F_v)} dF_v, \quad (16)$$

а взамен дискретной модели (15) рассмотрим следующее интегральное ограничение:

$$\int_0^{F_{max}} \varphi(F_v) dF_v = C_1; \quad C_1 = const. \quad (17)$$

Для вычисления оптимального вида функции, при которой $\delta_{ср.н.}$ достиг бы минимальной величины с учетом (16) и (17) составим вариационную оптимизационную задачу, целевой функционал F_0 которой имеет вид:

$$F_0 = \frac{1}{F_{vmax}} \int_0^{F_{vmax}} \frac{F_v I_t}{\varphi(F_v)} dF_v + \gamma \left[\int_0^{F_{max}} \varphi(F_v) dF_v - C \right]. \quad (18)$$

Решение задачи (18) согласно [Эльсгольд, 1974] должно удовлетворять условию:

$$\frac{d \left\{ \frac{F_v I_t}{\varphi(F_v) F_{vmax}} + \gamma \varphi(F_v) \right\}}{d\varphi(F_v)} = 0. \quad (19)$$

Из условия (19) получаем:

$$-\frac{F_v I_t}{\varphi^2(F_v) F_{vmax}} + \gamma = 0. \quad (20)$$

Из выражения (20) находим:

$$\varphi(F_v)_{opt} = \sqrt{\frac{F_v I_t}{\gamma F_{max}}} \quad (21)$$

С учетом выражений (17) и (21) получим:

$$\sqrt{\frac{I_t}{\gamma F_{max}}} \int_0^{F_{max}} \sqrt{F_v} dF_v = C_1. \quad (22)$$

Из выражения (22) находим:

$$\frac{1}{3/2} \sqrt{\frac{I_t}{\gamma F_{vmax}}} F_{vmax}^{\frac{3}{2}} = C_1 \quad (23)$$

или

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{I_t}{\gamma}} F_{vmax} = C_1$$

или

$$\frac{4 I_t}{9 \gamma} F_{vmax}^2 = C_1^2$$

или

$$\gamma = \frac{4 I_t F_{vmax}^2}{9 C_1^2}. \quad (24)$$

С учетом выражений (21) и (24) находим:

$$\varphi(F_v)_{opt} = \sqrt{\frac{F_v}{\frac{4 F_{vmax}^2 F_{vmax}}{9 C_1^2}}} = \frac{3}{2} C_1 \sqrt{\frac{F_v}{F_{vmax}^3}}. \quad (25)$$

Очевидно, что на решении (25) функционал F_0 достигает минимума т.к. производная выражения (20) по искомой функции является положительной величиной.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, рассмотрена и решена задача минимизации суммарного смаза изображений, выдаваемых камерой, установленной на БПЛА, осуществляющего непрерывный полет над различиями сельскохозяйственными полями, в которых выращивается разнообразная сельхозпродукция. Рассмотрен режим полета БПЛА, в котором скорость полета увеличивается непрерывно от минимума до максимума. При таком динамическом режиме полета требуется определить порядок чередования полей, в которых показатель GSD составляет некоторое множество. При условии наложения некоторого ограничения на сумму используемых величин GSD вычислена требуемая функциональная зависимость $GSD = \varphi(F_v)_{opt}$ при которой среднесуммарная величина смаза достигает минимальной величины.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулирована и решена задача нахождения оптимального режима прохождения исследуемых зон, в которых требуемые показатели GSD составляют некоторое множество, а скорость полета БПЛА, снабженного камерой, линейно растет.
2. Принято допущение о том, что сумма показателей GSD на исследуемых полях представляет собой постоянную величину, что вполне реально при исследовании нескольких сельскохозяйственных полей, в которых выращиваются разные виды растительной сельхозпродукции.
3. Вычислен оптимальный вид функциональной зависимости GSD от скорости полета БПЛА, при которой суммарный смаз изображений может достичь минимума. Такой результат

позволяет выбрать оптимальный маршрут прохождения БПЛА указанных полей по критерию достижения минимального смаза получаемых изображений.

ЛИТЕРАТУРА

- Эльсгольц Л. Э. *Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление*// М. Наука. 1974. Стр. 432.
- Chen R., Chu T., Landivar J. A., Yang C., Maeda M. M. *Monitoring cotton (*Gossypium hirsutum* L) germination using ultrahigh-resolution UAS images*// *Precis. Agric.* 2017. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9508-7>.
- Geipel J., Link J., Claupein W. *Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. Remote Sens.* 2014; 11:10335–55. <https://doi.org/10.3390/rs61110335>.
- Holman F. H., Riche A. B., Michalski A., Castle M., Wooster M. J., Hawkesford M. J. *High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing*// *Remote Sens.* 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8121031>.
- Jin X., Liu S., Baret F., Hemerle M., Comar A. *Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery*// *Remote Sens. Environ.* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.007>.
- Lelong C., Burger P., Jubelin G., Roux B., Labbe S., Baret F. *Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots*// *Sensors.* 2008. <https://doi.org/10.3390/s8053557>.
- Liebisch F., Kirchgessner N., Schneider D., Walter A., Hund A. *Remote aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach* // *Plant method.* 2015. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0048-8>.
- Liu T., Li R., Jin X., Ding J., Zhu X., Sun C., Guo W. *Evaluation of seed emergence uniformity of mechanically sown wheat with UAV RGB imagery*// *Remote Sens.* 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9121241>.
- Maimaitijiang M., Ghulam A., Sidike P., Hartling S., Maimaitiyiming M., Peterson K., Shavers E., Fishman J., Peterson J., Kadam S., Burken J., Fritschi F. *Unmanned aerial system (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine*// *ISPRS J Photogramm remote sens.* 2017. Pp. 43-58. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011>.
- Roth L., Roth A., Hund, and H. Aasen. *PhenoFly Planning Tool: flight planning for high-resolution optical remote sensing with unmanned areal systems. Plant Methods,* 14(116), 2018. doi: 10.1186/s13007-018-0376-6. URL <https://shiny.usys.ethz.ch/PhenoFlyPlanningTool/>.
- Roth L., Aasen H., Walter A., Liebisch F. *Extracting leaf area index using viewing geometry effects-a new perspective on high-resolution unmanned aerial system photography*// *ISPRS j Photogramm remote sens.* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.012>.
- Roth L., Streit B. *Predicting cover crop biomass by lightweight UAS-based RGB and NIR photography: an applied photogrammetric approach*//*Precis Agric.* 2018. Pp. 93-114. <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9501-1>.
- Torres-Sanchez J., Pena J. M., de Castro A., Lopez-Granados F. *Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV*// *Comput Electron Agric.* 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>.

OPTIMIZATION OF PASSAGE ROUTE OF VEGETATION FIELDS BY UAV EQUIPPED WITH A CAMERA IN FLIGHT MODE WITH VARIABLE SPEED

Aliyeva G.V., Huseynov O.A.

The article is devoted to the optimization of the operating mode of an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a camera. The problem of minimizing the total blurring of images generated by a camera mounted on a UAV carrying out continuous flight over various agricultural fields in which a variety of agricultural products are grown is formulated and solved. A dynamic UAV flight mode is considered in which the flight speed increases continuously from minimum to maximum. With such a dynamic flight mode, it is necessary to determine the route of passage of fields in which the GSD (ground sampling distance) indicator is a certain set. If there is some limitation on the total value of the available GSDs, which is a specific for considered period of vegetation growth, the required functional dependence $GSD = \varphi(F_v)_{opt}$ is calculated at which the minimum average sum of the received images can be achieved

KEYWORDS: UAVs, IMAGE LUBRICATION, OPTIMIZATION, FLIGHT SPEED, REMOTE SENSING.