

# ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 528. 735

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-194-202

## Метод сшивания кадров аэрофотоснимков в системах видеонаблюдения

*В.Д. Колдаев, Наинг Линн Аунг*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*koldaev.v@mail.ru*

Для получения высококачественных изображений местности широко используются беспилотные летательные аппараты. Одной из задач фотограмметрической обработки снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата, является топографическое обеспечение территории.

Предложен метод, основанный на оценочных характеристиках с использованием опорных точек, для сшивания кадров изображений, полученных с беспилотных летательных аппаратов. Проанализирована многомаршрутная (площадная) аэрофотосъемка, позволяющая получать снимки местности с нескольких параллельных маршрутов. Для получения приемлемой точности кадров учтена ошибка проекции в отношении высоты объекта.

Рассмотренная модель фотограмметрической обработки цифровых данных, полученных с любого носителя съемочной аппаратуры, может использоваться для решения широкого спектра задач, связанных с реконструкцией антропогенных и природных объектов и построением по цифровым снимкам 3D-моделей для архитектуры и топографии. Для применения алгоритма быстрого сшивания кадров изображений масштабы снимков варьируются от 1:10000 до 1:50000, а точность сшиваемых изображений может достигать 1 м в пространстве объектов.

*Ключевые слова:* изображение; объект; кадр; реперные точки; аэрофотосъемка; беспилотные летательные аппараты.

*Для цитирования:* Колдаев В.Д., Наинг Линн Аунг. Метод сшивания кадров аэрофотоснимков в системах видеонаблюдения // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 2. – С. 194–202. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-194-202

## **Method of Sewing Aerial Photographs in Video Surveillance Systems**

*V.D. Koldaev, Naing Linn Aung*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*koldaev.v@mail.ru*

To obtain the high-quality photographs of environment the unmanned aerial vehicles are commonly used.

One of the tasks of photogrammetric processing of images, obtained from unmanned aerial vehicle, is providing topographic areas. A method based on the estimated characteristics, using the reference points for sewing together the frames of the image from unmanned aerial vehicles, has been offered. The multi-route (area) aerial photography permitting to receive the aerial pictures from several parallel routs has been analyzed. To obtain acceptable frame accuracy, the projection error with respect to the object height has been taken into account.

The considered model of the photogrammetric processing of digital data, obtained from any recoding equipment, is used to solve a wide range of the tasks related to the reconstruction of 3D models for architecture and topography from digital images. To apply fast sewing the frames of an image, the scales of photos vary from 1:10000 to 1:50000, and the accuracy of images being sewn can reach 1 m in space of the objects.

*Keywords:* picture; frame; control points; aerial photography; unmanned aerial vehicles.

*For citation:* Koldaev V.D., Naing Linn Aung. Method of sewing aerial photographs in video surveillance systems // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 2. – P. 194–202. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-194-202

**Введение.** Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются для получения высококачественных изображений местности в военной и гражданской областях. Фотограмметрия находит применение при создании топографических карт и GIS-систем, в геологии, при проектировании и строительстве зданий и сооружений, археологических раскопках и т.д. Вопросами формирования панорамных изображений занимаются как в России, так и за рубежом.

Задача слежения за объектами включает множественные целевые объекты и объекты-дистракторы. Результатом является объединение кадров изображения для получения такого перекрытия, при котором наибольшее количество соответствующих точек разных объектов изображений совмещаются в результирующем кадре. Ключевыми объектами на изображении могут быть точка (пиксель), линия или сегмент изображения. Для детектирования ключевых точек используются различные детекторы: Мора-веца, Харриса, FAST, MSER, а также методы LSD и Хафа. Описание признаков детектированных ключевых объектов для большого класса задач осуществляется с помощью дескрипторов, позволяющих идентифицировать области, края и углы: SIFT, SURF, BRIEF, ORB, CLON, DAISY и др.

**Технология сшивания кадров изображений.** При аэрофотосъемке плоскость видеокамеры может принимать вертикальное и горизонтальное положение, формируя

«перспективные» и «плановые» типы съемки. Фотографическое качество зависит от состояния атмосферы, освещения объекта, технических условий проведения фотографирования, фотохимической обработки снимков. После получения изображений осуществляется их фотограмметрическая обработка для установления относительной ориентации объектов с определением точек разрыва, пересечения, а также реперных точек на каждом из кадров, которые статически отличаются от однородного фона изображения (углы, границы предметов или текстуры). Реперная точка изображения отличается характерной окрестностью, которая имеет признаки, существенно отличающие ее от основной массы точек [1]. Главной проблемой применения БПЛА для фотографирования земной поверхности является использование неметрических профессиональных или любительских цифровых фотокамер, отсутствие систем стабилизации БПЛА и контроля элементов внутреннего и внешнего ориентирования.

Для решения задачи сшивания кадров аэрофотоснимков в системах видеонаблюдения используются следующие этапы:

- получение и обработка данных с видеокамер: применение различных фильтров обработки изображений для изменения яркости, четкости и т.п.;
- нахождение особых точек на каждом из кадров;
- установление соответствия между различными кадрами с учетом наборов реперных точек и их дескрипторов;
- расчет параметров преобразований, переводящих координаты каждого кадра изображения в координаты панорамного изображения.

Реперная точка может быть угловой, изолированной точкой локального максимума (минимума) линии интенсивности, концом линии или точкой на кривой, у которой кривизна локально максимальна. При поиске реперной точки анализируются вершины дерева (*tree*) от корня к листьям по условию  $tree \rightarrow x[i] (<, \geq) tree \rightarrow t$  и определяется ближайший элемент с минимальным расстоянием [2]:

$$R = l_{\min} = \sqrt{((x_0 - x[i]_0)^2 + (x_1 - x[i]_1)^2 + \dots + (x_n - x[i]_n)^2)} .$$

Каждая точка описывается набором признаков – дескрипторов, инвариантных относительно поворота и изменения масштаба изображения. Дескрипторы могут быть представлены внешними (границей) или внутренними (совокупностью элементов области) характеристиками. Точность соответствующих точек влияет на качество сшиваемых кадров изображения, имеющих перекрытия, – части снимков, на которых изображена одна и та же местность. Значения перекрытия выражают в процентах от длины стороны снимков [3]. Взаимное перекрытие снимков одного маршрута – это продольное перекрытие, рассчитываемое по формуле  $p_x = \frac{l_x}{l} \cdot 100\%$ , где  $l_x$  – размер перекрывающихся частей снимка;

$l$  – длина стороны снимка по направлению маршрута. Обычно продольное перекрытие составляет 55–65 %, а поперечное перекрытие – 25–35 %.

При соединении без общих областей на границах соединения изображений будут наблюдаться искажения и неточности сшивания, связанные с механическими люфтами объектива, абберациями, отсутствием программного сопоставления изображений. В связи с этим возникает задача соединения соседних кадров в единое изображение по некоторой линии («шву»), лежащей в зоне перекрытия. Для этого на соседних кадрах выделяют реперные точки и проводят через них прямую, которая будет «швом». Проективное преобразование точки  $(x, y)$  записывается следующей системой:

$$x' = (Ax + By + C)/(ax + by + c), \quad y' = (Dx + Ey + F)/(ax + by + c)$$

или в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ a & b & c \end{bmatrix}.$$

Искажения изображения, возникающие при склейке, являются результатом проективного преобразования точек:

$$x'_i = (Ax_i + By_i + C)/(ax_i + by_i + c), \quad y'_i = (Dx_i + Ey_i + F)/(ax_i + by_i + c), \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

Решение системы – бесконечное множество кортежей коэффициентов (матриц преобразования). Возможны случаи, когда две различные матрицы задают одно и то же преобразование, например:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 4 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

При создании результирующего изображения на него переносится один из кадров. Для второго изображения на основе матрицы трансформации попиксельно вычисляется координата перемещения пиксела. Если кадр был подвергнут растяжению по какой-либо оси, то появятся разрывы в перенесенном изображении. В этом случае значения этих пикселей можно заполнить с помощью билинейной интерполяции. Для получения результирующего изображения необходимо обработать как минимум 15 кадров в секунду [2]. Многомаршрутная (площадная) фотосъемка представляет собой получение снимков местности с нескольких параллельных маршрутов [4].

**Метод сшивания кадров изображения на основе оценочных характеристик.** Предлагаемый метод сшивания кадров изображений, полученных с БПЛА, основан на преобразовании аффинных координат как минимум двух соответствующих точек. Метод, построенный на оценочных характеристиках, начинается с установления соответствия между реперными точками, линиями, гранями. При расчете преобразований определяются параметры, переводящие координаты исходного изображения в координаты проективного изображения. После получения гомологических точек отснятые изображения будут сшиваться с использованием аффинных координат [5, 6]:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1x' + a_2y', \\ y &= b_0 + b_1y' + b_2y', \end{aligned} \tag{1}$$

где  $(x, y)$  – координаты трансформации изображения;  $(x', y')$  – координаты исходного изображения;  $(a_i, b_i)$  – элементы трансформации.

Качество сшитых изображений связано с ошибками выбора гомологических точек и масштабного фактора. В уравнениях (1) для преобразования шести элементов требуется только три пары гомологических точек. При обработке аэрофотоснимков помимо контуров местности необходимо знать и высотное положение точек местности относительно уровенной поверхности (их высоты или глубины). На рис.1 показано смещение точек изображения при изменении высоты полета для обработки аэрофотоснимков и приняты следующие обозначения:  $H, h$  – высота полета БПЛА и объекта соответственно;  $a$  и  $A'$  – проекции объекта ( $A$ ) на изображение и плоскую поверхность соответствен-

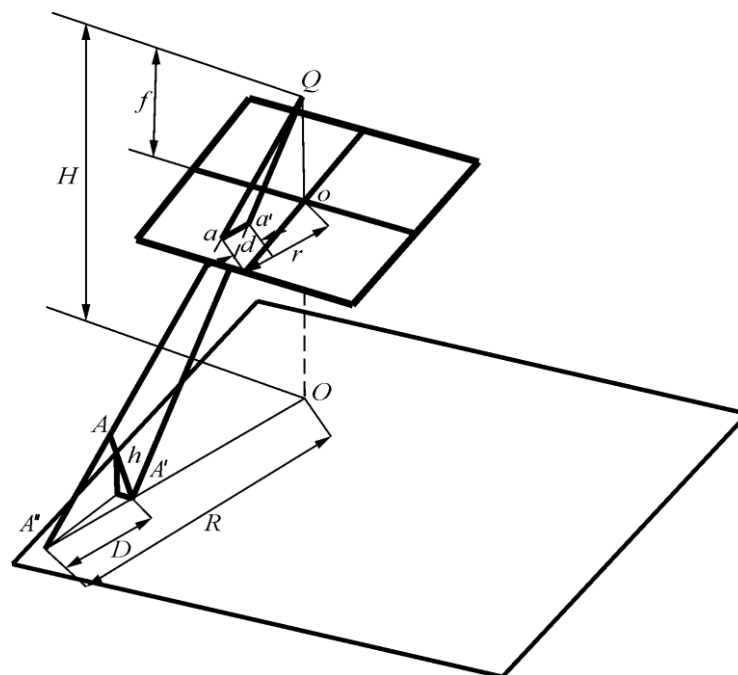


Рис.1. Смещение точек изображения при изменении высоты  
 Fig.1. The displacement of pixels of the image when changing height

но;  $d$  и  $D$  – перемещения;  $R$  – расстояние между проекцией главной точки и точки нулевых искажений (пересечения биссектрисы угла наклона и плоскости снимка);  $f$  – фокусное расстояние [6]. Реперные точки изображения лежат на одной горизонтальной плоскости.

В соответствии с параметрами съемки происходит подборка необходимой высоты полета, отвечающей заявленному качеству и предполагаемому масштабу снимков:  $Q = f/H_g$ , где  $Q$  – масштаб снимка;  $f$  – фокусное расстояние, полученное после калибровки видеокамеры;  $H_g$  – относительная высота проведения аэрофотосъемки (от земной поверхности до летательного аппарата). Таким образом, математические соотношения можно выразить как

$$\frac{D}{h} = \frac{R}{H}, \quad d_{l,r} = \frac{r_{l,r} h}{H_{l,r}}$$

где  $d_{l,r}$  – ошибка проекции на левое (правое) изображение;  $r_{l,r}$  – расстояние между главной точкой и точкой изображения объекта;  $H_{l,r}$  – высота полета.

При оценке фотограмметрического качества устанавливают степень соблюдения заданных продольных и поперечных перекрытий, непрямолинейность съемочных маршрутов, систематическую непараллельность продольных сторон аэрофотоснимков базисам фотографирования, разномасштабность и др. На рис.2 приведена проекция одного объекта на другой для обработки кадров изображения и приняты следующие обозначения:  $O_1, O_2$  – положения главных точек соседних изображений;  $S$  – базовая линия;  $A''_1, A''_2$  – проекции объекта изображения на поверхности [7]. При этом имеем

$$\frac{A''_1 A''_2}{O_1 O_2} = \frac{D_1}{R_1 - D_1} = \frac{D_2}{R_2 - D_2} = \frac{D_{1,2}}{R_{1,2} - D_{1,2}}$$

Ошибка проекции высоты объекта вычисляется относительно смежных изображений:

$$\Delta D = \frac{D_{1,2}S}{R_{1,2} - D_{1,2}},$$

$$\Delta d = \frac{rh}{rH - rh} \cdot \frac{Sf}{H} = \frac{hSf}{H^2 - hH} = \frac{Sf}{H(Hh^{-1} - 1)}.$$

Соседние изображения, лежащие на горизонтальной плоскости, обрабатываются с помощью уравнений (1) для получения шести элементов преобразования ( $a_i, b_i$ ). Тогда гомогенные точки одного изображения переводятся в координаты другого и осуществляется сшивание смежных снимков. Следующим шагом в процессе сшивания является преобразование между координатами объекта и изображения [8]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

где  $X, Y, Z$  – координаты объекта;  $x, y, z$  – координаты изображения;  $P$  – матрица поворота.

Часто снимаемый участок не может быть размещен на одном снимке, тогда участок фотографируется последовательно, маршрут за маршрутом и обычно с запада на восток (или в обратном направлении) на постоянной высоте. Если гомологические точки являются избыточными для уравнений (1), то используется модель наименьших квадратов [7, 8]:

$$V = AX - L, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x' & y' & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & x' & y' \end{pmatrix},$$

$$X = (a_0 \quad b_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad b_1 \quad b_2)^T, \quad L = (x \quad y)^T.$$

В быстром сшивании изображений, полученных с БПЛА на территории с холмами, ошибки проекции высоты объекта должны рассматриваться как билинейная трансформация:

$$x = a_0 + a_1x' + a_2y' + a_3x'y', \quad y = b_0 + b_1x' + b_2y' + b_3x'y'.$$

Таким образом, набор изображений можно разбить на несколько полос, а разные полосы сшитых изображений могут быть связаны аффинными преобразованиями.

**Результаты эксперимента.** Эксперимент проводился на местности с холмами (высота 600 м, разрешение снимков 4000×3000). Процесс быстрого сшивания осуществлялся по траектории полета БПЛА. На рис.3 показан результат сшивания 36 индивидуальных кадров изображений.

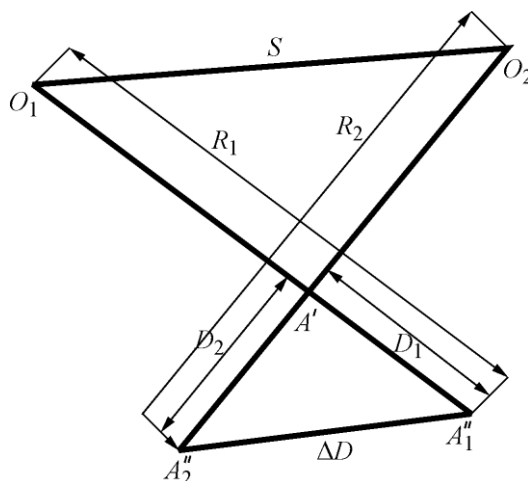


Рис.2. Проекция одного объекта на другой  
Fig.2. The projection of one object to another

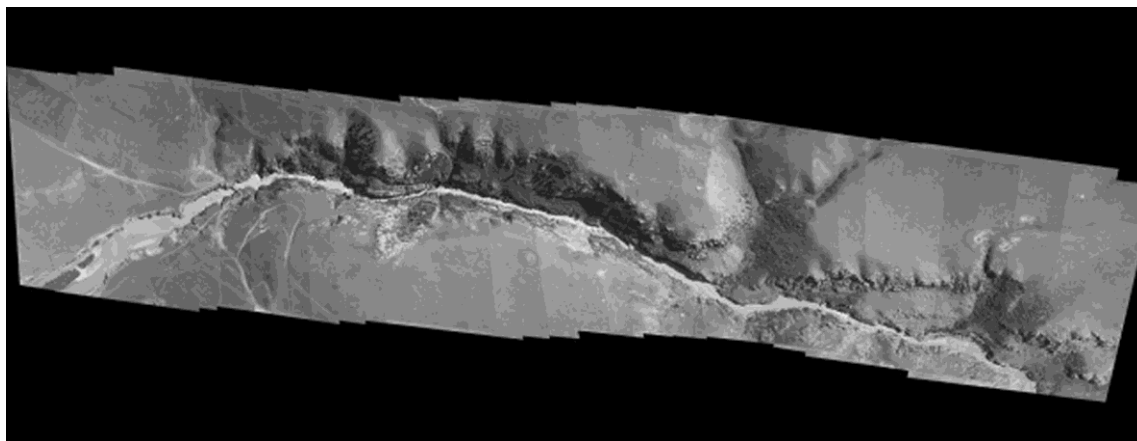


Рис.3. Сшивание кадров аэрофотоснимков  
Fig.3. Stitching frames of aerial photographs

Каждому изображению полосы присвоен идентификационный номер слева направо. Результаты среднеквадратичного значения (СКЗ) ошибок для каждого изображения местности показаны на рис.4. От изображения 1 до изображения 13 СКЗ ошибки выше 6 пикселей, т.е. для местности с холмами и городскими районами с высотными зданиями СКЗ ошибок увеличиваются. Характер распределения ошибок связан со сложной unevenной поверхностью. Если высота объекта  $h$  над земной поверхностью близка к нулю, то  $\Delta d \approx 0$ . При относительных ошибках определения высот (1:2500–1:3000) от высоты фотографирования СКЗ определения положения точек лежит в пределах от 0,2 до 0,4 м при максимальных значениях от 0,8 до 2,0 м.

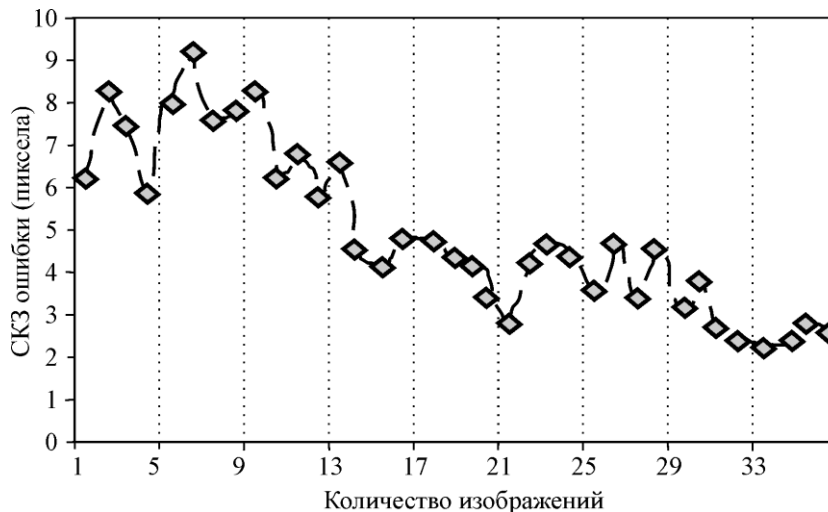


Рис.4. СКЗ ошибок для изображений местности  
(—◆— индивидуальные кадры изображений)  
Fig.4. RMS error values for terrain images  
(—◆— individual frames of images)

**Заключение.** В предложенном методе сшивания кадров изображений, полученных с БПЛА, используются однородные реперные точки. Для определения приемлемой точности элементов изображения учитывается ошибка проекции по отношению к высоте объекта. Для плоских поверхностей аффинное преобразование можно использовать для перевода координат одного кадра изображения на другой.

Для применения быстрого сшивания кадров изображений, полученных с БПЛА, масштабы снимков варьируются от 1:10000 до 1:50000, а точность сшиваемых изображений может достигать 1 м в пространстве объектов.

Результаты экспериментов показали, что рассмотренный алгоритм быстрого сшивания кадров при повороте изображения в плоскости изображения сцены дает результаты, сравнимые с алгоритмом SIFT, и имеет скорость обработки, близкую к скорости обработки алгоритма SURF.

### Литература

1. **Колдаев В.Д.** Методологические подходы к выделению инвариантных характеристик изображений // Наука 21 века: вопросы, гипотезы, ответы. – 2016. – №3 (18). – С. 57–62.
2. **Ессин А.С., Ессин С.С.** Технология фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, полученных с БПЛА, в целях создания ортофотопланов. – М.: Геодезиздат, 2003. – 296 с.
3. **Han X., Yan L., Zhao H., Yang S.** An approach of fast mosaic for serial remote sensing images from UAV // IEEE Proceedings of Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (24–27 Aug.). – Haikou, China, 2007. – P. 11–15.
4. **Колдаев В.Д.** Организация данных в адаптивных системах распознавания изображений // Материали за X международна научна практична конференция «Найновите научни постижения – 2014» (17–25 март 2014 година). Т. 28. Математика. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2014. – С. 44–49.
5. **Богомазов С.В.** Фотограмметрия и дистанционное зондирование: методические указания. – Пенза: БИБКОМ, 2011. – 120 с.
6. **Zhou G.** Near real-time orthorectification and mosaic of small UAV video flow for time-critical event response // Geoscience and Remote Sensing, Transactions on IEEE. – 2009. – Vol. 47. – №3. – P. 739–747.
7. **Колдаев В.Д.** Методы формирования признаков изображений // Materiały X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa myśl informacyjnej powieki - 2014» (07-15 marca 2014 roku). Vol. 27. Matematyka, Fizyka. – Przemysł: Nauka i studia, 2014. – С. 50–54.
8. **Редько А.В., Константинова Е.В.** Фотографические процессы регистрации информации: учеб. пособие для вузов. – СПб.: Политехника, 2005. – 592 с.

Поступила 10.07.2017. г.; принята к публикации 16.01.2018 г.

**Колдаев Виктор Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), koldaev.v@mail.ru

**Наинг Линн Аунг** – аспирант кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1.), nainglinnaung53@gmail.com

### References

1. Koldaev V.D. Metodologicheskie podhody k vydelenyu invariantnyh harakteristik izobrazhenij [Methodological approaches to the selection of the invariant characteristics of images]. *Nauka 21 veka: voprosy, gipotezy, otvety – Science of the 21st century: issues, hypotheses, answers*, 2016, no. 3 (18), pp. 57–62. (in Russian).
2. Essin A.S., Essin S.S. *Tekhnologiya fotogrammetricheskoy obrabotki aerofotosnimkov, poluchennyh s BPLA, v celyah sozdaniya ortofotoplanov* [Technology of photogrammetric processing of aerial imagery obtained from UAVs, in order to create orthophotos]. Moscow, Geodezizdat Publ., 2003. 296 p. (in Russian).
3. Han X., Yan L., Zhao H., Yang S. An Approach of Fast Mosaic for Serial Remote Sensing Images from UAV. *IEEE Proceedings of Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Haikou, China, 2007, pp. 11–15.
4. Koldaev V.D. Organizaciya dannyh v adaptivnyh sistemah raspoznavaniya izobrazhenij [Data organization in the adaptive systems of recognition of images]. *Materiali za X mezhdunarodna nauchna praktichna*

*konferenciya «Najnovite nauchni postizheniya – 2014»*. Vol. 28. *Matematika* [Materials of X international scientific-practical conference «Ninevite scientific achievements – 2014». Vol. 28. Mathematics]. Sofiya, «Byal GRAD-BG» OOD Publ., 2014, pp. 44–49.

5. Bogomazov S.V. *Fotogrammetriya i distancionnoe zondirovanie: metodicheskie ukazaniya* [Photogrammetry and remote sensing: guidelines]. Penza, BIBKOM, Publ., 2011. 120 p. (in Russian).

6. Zhou G. Near real-time orthorectification and mosaic of small UAV video flow for time-critical event response. *Geoscience and Remote Sensing, Transactions on IEEE*, 2009, vol. 47, no. 3, pp. 739–747.

7. Koldaev V.D. Metody formirovaniya priznakov izobrazhenij [Methods of forming features of images]. *Materiały X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa myśl informacyjnej powieki – 2014»*. Vol. 27. *Matematyka, Fizyka* [Materials X International scientific-practical conference «Scientific thought the information century – 2014». Vol. 27. Mathematics. Physics]. Przemysł, Nauka i studia Publ., 2014. pp. 50–54.

8. Red'ko A.V., Konstantinova E.V. *Fotograficheskie processy registracii informacii: uchebnoe posobie dlya vuzov* [The Photographic processes of registration of information: training manual for universities]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2005. 592 p. (in Russian).

Submitted 10.07.2017; accepted 16.01.2018.

**Koldaev Victor D.** – Dr. Sci. (Tech.), Prof. of the Computer Science Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq, 1), koldaev.v@mail.ru

**Naing Linn Aung** – PhD student of the Computer Science Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq, 1), nainglinnaung53@gmail.com