

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Исследование лесных территорий с использованием данных беспилотных летательных аппаратов на сегодняшний день является одним из наиболее доступных способов мониторинга параметров древостоев. Для изучения параметров отдельных деревьев в зависимости от времени важной является точная географическая привязка регистрируемых фотоизображений. В работе предлагается способ уточнения геопривязки аэрофото-снимков за счет применения к фотоизображениям с географически привязанными центрами алгоритмов библиотеки компьютерного зрения. В результате применения разработанного способа удалось достичь уменьшения среднего радиуса разброса координат древостоев при геопривязке на 46%.

В современном мире использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для исследования объектов поверхности Земли с малых высот является одним из способов анализа последствий чрезвычайных ситуаций [1], оценки состояния растительного покрова в пустынях [2], прогнозирования урожайности в сельском хозяйстве [3] и др. Для большинства задач существует необходимость сшивки всех зарегистрированных с помощью БПЛА данных в единое географически привязанное изображение. Географическую привязку обеспечивают входящие в состав БПЛА приемники радионавигационных сигналов. Сшивка данных, как правило, осуществляется с использованием дополнительного программного обеспечения.

Для построения ортофотопланов используются различные подходы. Один из них основан на поиске на объединяемых изображениях специфических областей – особых точек, последующем их сопоставлении и определении относительного смещения изображений на основе полученной информации [4]. Такой подход хорошо работает при трассовой съемке, однако при съемке методом параллельного галсирования изображения, полученные на близлежащих галсах полета БПЛА, могут быть смещены вследствие накопления ошибок, вызванных внешними факторами (например, наличием ветра при съемке лесной территории). Зачастую фотоизображения БПЛА в качестве географической привязки обладают координатами лишь центров кадров. В случае, когда при аэрофотосъемке не используются RTK-системы (Real Time Kinematic), точность такой геопривязки данных достаточно низка. Целью данного исследования стала разработка способа повышения точности географической привязки изображений, получаемых с использованием БПЛА мультироторного типа, обладающего камерой видимого диапазона и приемником сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), без учета поправок, вносимых RTK-системами.

Для решения задачи уточнения географической привязки изображений земной поверхности было принято решение в данном исследовании применить подход, где основополагающим будет использование одновременно и GPS-координат, соответствующих отдельным изображениям, и пиксельных смещений между изображениями, вычисленных на основе анализа особых точек в изображениях. Исследование проводилось на примере данных, зарегистрированных БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral с высоты 100 м над поверхностью Земли. Данные были получены в ходе летного эксперимента, проведенного 06.10.2022-11.10.2022 на территории учебно-географической станции БГУ «Западная Березина». Большую часть зарегистрированных объектов составляли древостои различных пород, определение координат которых являлось приоритетной задачей. Описываемые в работе алгоритмы получили реализацию в качестве составных частей программного обеспечения (ПО), разработанного с помощью фреймворка Qt на языке программирования C++ с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

Важно отметить, что описанная выше задача, вообще говоря, не имеет единственного решения при проведении аэрофотосъемки территории лесного массива с предельно низких высот. Это обусловлено существенным различием высоты объектов на регистрируемых изображениях, что приводит к фактическим различиям в линейном пространственном разрешении на пиксель аэрофотосистем в разных зонах отдельных кадров (рисунок 1).

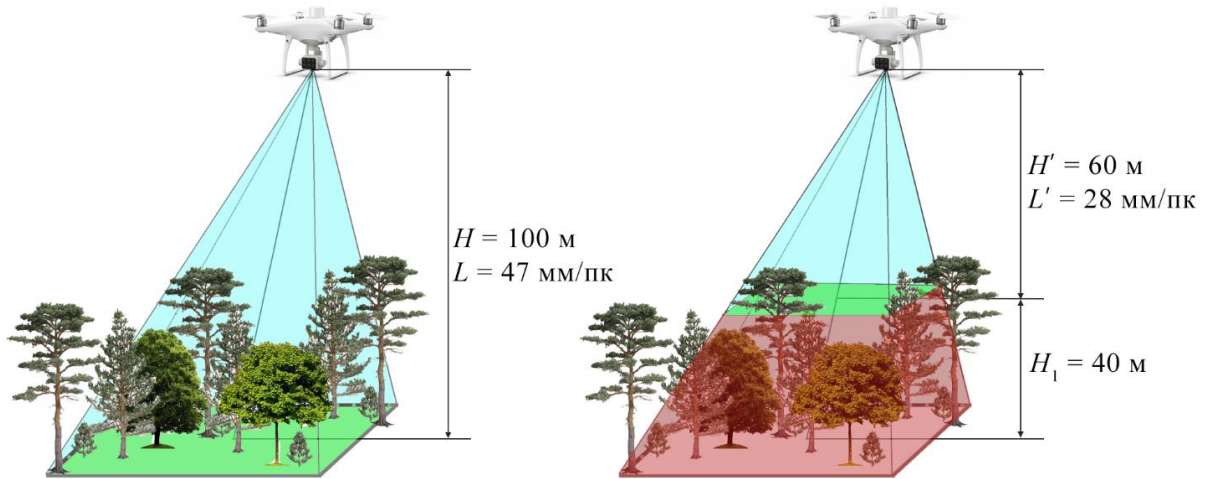


Рисунок 1 – Различия в линейном пространственном разрешении ( $L$ ) при съемке разновысотных объектов

Для корректного определения географических координат изображений в работе использовался адаптивный подход, основанный на поиске коэффициентов масштабирования близлежащих изображений. Коэффициенты масштабирования определялись как соотношения пиксельных смещений между изображениями, вычисленных на основе данных ГНСС-приемника и на основе расстояния между особыми точками, детектированными с использованием алгоритмов библиотеки компьютерного зрения:

$$S = \frac{\Delta r_g}{\Delta r_p}, \quad (1)$$

где  $\Delta r_g$  – пиксельное расстояние между центрами близлежащих кадров, рассчитанное на основе базовой геопривязки аэрофотоснимков;  $\Delta r_p$  – пиксельное расстояние между центрами близлежащих кадров, рассчитанное на основе координат особых точек в аэрофотоснимках (в обоих случаях пиксельное расстояние определяется по формуле  $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ).

В качестве алгоритмов работы с особыми точками в исследовании использовалось сочетание детектора ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) и дескриптора FREAK (Fast Retinal Key-point) с сопоставлением дескрипторов особых точек полным перебором с метрикой сравнения Хэмминга [5], так как для данных БПЛА такой вариант демонстрирует наилучшие показатели по качеству шивки среди исследованных методов [4]. Перед проведением поиска особых точек для всего набора изображений необходимо проведение коррекции искажений на изображениях, вызываемых эффектом дисторсии. Такая коррекция осуществлялась в работе на основе лабораторного эксперимента по определению коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии по методике, описанной в [4]. Пересчет координат изображений из географических в пиксельные (и обратно), а также поворот и линейное смещение системы координат проводились с использованием существующих методов пересчета на основе экспериментально определенного углового пространственного разрешения съемочной системы по методике, аналогичной описанной в [6].

После расчета по формуле (1) коэффициентов масштабирования для каждого кадра проведенного эксперимента также рассчитывалось дополнительное линейное смещение по осям изображения с целью компенсировать неточность определения географических координат. Эти смещения рассчитывались по следующим формулам:

$$\begin{cases} \Delta x^{i,j} = \frac{1}{2}(\Delta x_g^{i+1,j} + \Delta x_g^{i-1,j}) - \left[ \frac{1}{2}(S^{i+1,j} + S^{i,j}) \cdot \Delta x_p^{i+1,j} + \frac{1}{2}(S^{i-1,j} + S^{i,j}) \cdot \Delta x_p^{i-1,j} \right] \\ \Delta y^{i,j} = \frac{1}{2}(\Delta y_g^{i,j+1} + \Delta y_g^{i,j-1}) - \left[ \frac{1}{2}(S^{i,j+1} + S^{i,j}) \cdot \Delta y_p^{i,j+1} + \frac{1}{2}(S^{i,j-1} + S^{i,j}) \cdot \Delta y_p^{i,j-1} \right] \end{cases}$$

где  $i$  – номер строки изображения в серии;  $j$  – номер столбца изображения в серии.

В ходе проведенного летного эксперимента одна и та же территория лесного массива была зарегистрирована шестикратно. В результате аэрофотосъемок были получены по 100 изображений в каждой части эксперимента. Геопривязка данных была произведена несколькими способами: прямым наложением изображений на координатную сетку в соответствии с исходными координатами центров кадров; разработанным в ходе исследования способом; с помощью стандартного ПО для обработки данных, предоставляемого на платной основе компанией DJI. В сериях снимков определялись одни и те же деревья, фиксировались их географические координаты. После этого определялся разброс значений координат деревьев в сериях изображений. Средний радиус разброса значений географических координат составил при прямом наложении изображений 2,48 м; при использовании разработанного способа – 1,35 м; при использовании стандартного ПО – 1,58 м.

#### Заключение

В данном исследовании был разработан способ повышения точности географической привязки аэрофотоснимков, полученных со сверхмалых высот с использованием БПЛА. Повышение точности при использовании нового способа по сравнению с прямым наложением по координатам составляет в среднем 46% (уменьшение радиуса разброса координат относительно их математического ожидания на 1,13 м). За счет использования параллельных вычислений в разработанных программных модулях удалось ускорить обработку данных в сравнении со стандартным ПО более, чем в 3 раза.

#### Список литературы

1. Takhtkeshha, N.; Mohammadzadeh, A.; Salehi, B. A Rapid Self-Supervised Deep-Learning-Based Method for Post-Earthquake Damage Detection Using UAV Data (Case Study: Sarpol-e Zahab, Iran). *Remote Sens.* 2023, 15, 123. DOI: 10.3390/rs15010123.
2. He, J.; Lyu, D.; He, L.; Zhang, Y.; Xu, X.; Yi, H.; Tian, Q.; Liu, B.; Zhang, X. Combining Object-Oriented and Deep Learning Methods to Estimate Photosynthetic and Non-Photosynthetic Vegetation Cover in the Desert from Unmanned Aerial Vehicle Images with Consideration of Shadows. *Remote Sens.* 2023, 15, 105. <https://doi.org/10.3390/rs15010105>.
3. Guo, Y.; Zhang, X.; Chen, S.; Wang, H.; Jayavelu, S.; Cammarano, D.; Fu, Y. Integrated UAV-Based Multi-Source Data for Predicting Maize Grain Yield Using Machine Learning Approaches. *Remote Sens.* 2022, 14, 6290. <https://doi.org/10.3390/rs14246290>.
4. Ломако А. А. Метод формирования панорамных изображений по мультиспектральным данным беспилотного летательного аппарата, учитывающий дисторсию камеры. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2022;2:00–00. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-60-69>.
5. Кэлер А., Брэдски Г. Изучаем OpenCV 3. Слинкин А. А., переводчик; Мовчан Д., редактор. Москва: ДМК Пресс, 2017. С. 418– 578.
6. A. A. Lamaka, A. V. Gutarau, N. G. Shcherbakou, P. V. Ivuts. Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle. *Devices and Methods of Measurements.* 2023, vol. 14, no. 1, pp. 7–17. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17.