

УДК 528.71

Ломако А. А., Ивуть П. В., Гуторов А. В., Щербаков Н. Г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ АЭРОФОТОСИСТЕМ В ЛЕТНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

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

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты являются важным источником данных при дистанционном зондировании Земли. Для корректной обработки изображений, регистрируемых с использованием дронов, важно знать пространственное разрешение камеры, осуществляющей съемку. В работе предлагается методика оценки пространственного разрешения аэрофотосистем в летном эксперименте на основе регистрации мультиспектральных изображений штриховой миры. В результате применения методики выявлены различия в разрешающей способности каналов камеры до 11%.

В современном мире для исследований отражательных характеристик объектов на поверхности Земли широко используются изображения, зарегистрированные с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Для большинства задач существует необходимость сшивки всех зарегистрированных с помощью БПЛА данных в единое географически привязанное изображение, что требует перехода от географических координат к пиксельным. Чтобы осуществить такой переход, важно знать высоту съемки и пространственное разрешение камеры, установленной на БПЛА.

Существует методика, описывающая вариант решения задачи определения пространственного разрешения по результатам летного эксперимента [2]. Однако данная методика не описывает требования к мирам для определения пространственного разрешения и позволяет определять только линейное разрешение системы без оценки неопределенностей. Кроме того, существуют государственные стандарты, описывающие методы определения разрешающей способности и отдельные аспекты фотограмметрии, которые можно использовать. В то же время, важно разделить такие понятия как разрешение камеры и ее разрешающую способность.

Под линейным разрешением камеры стоит понимать величину, характеризующую длину (в метрах) части объекта, проекция которой приходится на пиксель матрицы. Это параметр, который необходим для корректного преобразования географических координат изображений в пиксельные при формировании ортофотопланов. Угловая разрешающая способность – это величина, характеризующая возможность распознавания близлежащих контрастных объектов на изображениях, зарегистрированных камерой. При этом экспериментальная угловая разрешающая способность систем зачастую довольно существенно может отличаться от теоретически рассчитанной [3].

Целью данной работы стала разработка подхода для формирования методики определения линейного пространственного разрешения и угловой разрешающей способности на пиксель аэрофотосистем. Отработка методики проводилась на данных, полученных с использованием БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral.

Теоретическое линейное разрешение на пиксель (L_0) может быть рассчитано по формуле:

$$L_0 = \frac{H}{f} \cdot \delta_{px}, \quad (1)$$

где H – высота съемки относительно поверхности; f – фокусное расстояние объектива камеры; δ_{px} – физический размер пикселя матрицы камеры, м.

В настоящей работе мира для определения разрешения состоит из набора групп штрихов различной частоты. Каждая группа состоит из пяти светлых, равных по ширине параллельных штрихов на темном фоне. Ширина промежутка между штрихами должна быть равна

ширине штриха. Отношение длины к ширине штрихов постоянно и равно 10. При этом ширина штрихов мира должна убывать от предыдущей группы к последующей по геометрической прогрессии со знаменателем 0,91. Мира должна быть спроектирована таким образом, чтобы рассчитанное по формуле (1) значение L_0 было больше минимального расстояния между чередующимися штрихами мира и меньше максимального расстояния между чередующимися штрихами как минимум вдвое (формула (1) представляет собой грубую оценку снизу пространственного разрешения камер, поэтому теоретическое значение линейного разрешения может существенно отличаться от экспериментально полученной разрешающей способности). В данной работе была спроектирована мира из 13 групп штрихов с шириной штриха от 32 до 100 мм (рисунок 1).

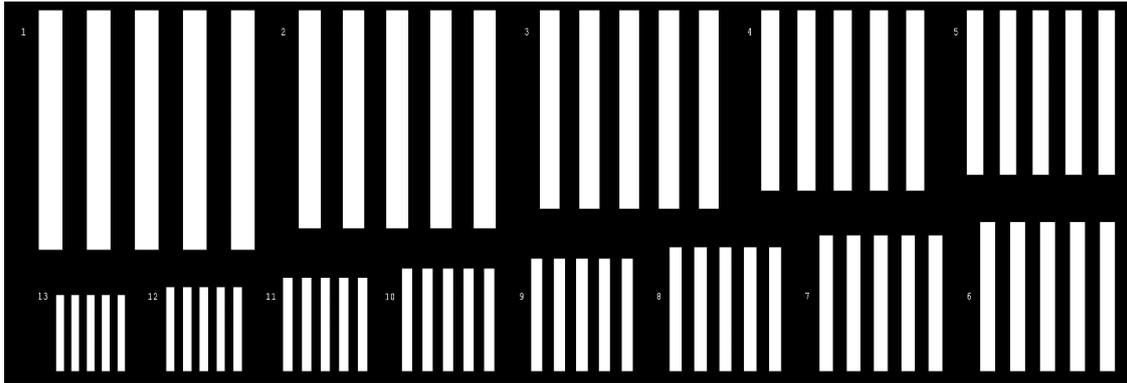


Рисунок 1 – Общий вид мира для определения пространственного разрешения камер аэрофотосистем

Эксперимент по определению пространственного разрешения обзорных камер должен проходить при отсутствии объектов, затеняющих поверхность участка измерений [2]. Проверка и измерение пространственного разрешения выполняется по не менее чем 20 изображениям штриховой мира для каждой высоты съемки. В анализе изображений рекомендуется участие 4 независимых дешифровщиков. Статистическую обработку результатов рекомендуется производить на основе государственных стандартов в области оценки лабораторных измерений.

Для определения экспериментальной угловой разрешающей способности (θ) выделяются группы штрихов, в которых все штрихи различаются по всей их длине. Разрешающая способность камер рассчитывается по формуле:

$$\theta = \arctg \frac{l_{iu}}{H} \cdot \frac{180}{\pi},$$

где l_{iu} – ширина штриха мира, относящегося к наименьшей группе штрихов, распознанной дешифровщиком.

Для определения линейного разрешения на пиксель необходимо на зарегистрированном изображении мира определить расстояние в пикселях между левым и правым краем наибольшей группы штрихов. В таком случае линейное разрешение для заданной высоты съемки можно рассчитать по формуле:

$$L = \frac{9l_{iu}^{\max}}{N} \cdot H,$$

где l_{iu}^{\max} – ширина штриха мира, относящегося к наибольшей группе штрихов мира; N – количество пикселей в изображении, расположенных между левым и правым краем наибольшей группы штрихов.

Для определения искомых величин был проведен летный эксперимент, в результате которого было зарегистрировано 35 мультиспектральных изображений разработанной мира с высоты 100 м относительно поверхности Земли. По итогам оценки линейного разрешения на пиксель камеры DJI Phantom 4 Multispectral определено, что оно остается неизменным для

всех спектральных каналов, и для высоты 100 м составляет 47,3 мм/пк со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,14$ мм/пк. Результаты экспериментального определения угловой разрешающей способности камеры представлены в таблице 1. Важно отметить, что значения угловой разрешающей способности мультиспектральной камеры в разных спектральных каналах могут существенно отличаться как от теоретического значения (в данном случае $\theta_0 = 0,025^\circ$), так и по отношению к другим каналам (рисунок 2).

Таблица 1

Экспериментальные оценки углового пространственного разрешения в каналах камеры

RGB изоб- ражения		Синий (450 ± 16 нм)		Зеленый (560 ± 16 нм)		Красный (650 ± 16 нм)		Красный край (730 ± 16 нм)		Ближний ин- фракрасный (840 ± 26 нм)	
$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$
0,0419	0,0020	0,0457	0,0025	0,0446	0,0026	0,0407	0,0025	0,0460	0,0017	0,0455	0,0024

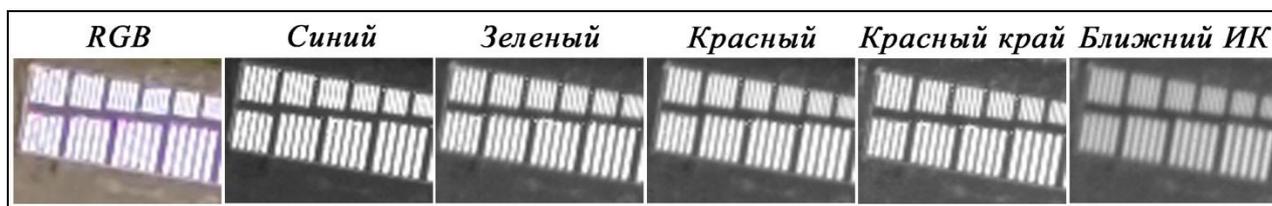


Рисунок 2 – Результаты съемки мира с высоты 100 м в различных каналах мультиспектральной камеры

Заключение

В настоящей работе был выработан подход к формированию методики определения линейного пространственного разрешения и угловой разрешающей способности на пиксель аэрофотосистем. Работоспособность подхода была проверена в ходе летных экспериментов, в результате которых были получены оценки линейного разрешения и угловой разрешающей способности камеры DJI Phantom 4 Multispectral. Это позволило выявить, что относительные различия экспериментально полученных величин в каналах камеры достигают 11%. Общую разрешающую способность камеры следует считать равной наименьшей величине среди всех каналов (в данном случае – 0,046 градуса). Важно отметить, что экспериментально определенные величины существенно отличаются от теоретически рассчитанных (относительная разность составила до 46%). Уточнение теоретического расчета возможно за счет учета площади, диаметра и пропускания входного объектива, удельной обнаружительной способности фотоприемника.

Список литературы

1. Lu H., Fan T., Ghimire P., Deng L. Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. Remote Sens. 2020, no. 12(16), 2542. DOI: 10.3390/rs12162542.
2. Молчанов А. С. Методика оценки линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем военного назначения при проведении летных испытаний. Изв. вузов «Геодезия и аэрофото-съемка». – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 390–396. DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-4-390-396.
3. 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.