

ВОЗДУШНАЯ КАЛИБРОВКА И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КРУПНОФОРМАТНОЙ КАМЕРЫ iXM-RS280F

Ю.Г. Райзман (Phase One Industrial, Дания)

В 1980 г. окончил аэрофотогеодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-аэрофотогеодезист», а в 1985 г. — аспирантуру ЦНИИГАиК по специальности «фотограмметрия». После окончания аспирантуры работал в Ташкентском аэрогеодезическом предприятии ГУГК СССР, с 1992 г. — в Геодезической службе Израиля, с 2008 г. — в компании VisionMap Ltd. (Израиль). С 2017 г. по настоящее время — научный консультант компании Phase One Industrial и директор компании GeoCloud Ltd.

Крупноформатная камера iXM-RS280F, разработанная компанией Phase One Industrial, может поставляться как самостоятельное решение, так и служить основой для различных конфигураций аэросъемочного комплекса PAS280MP [1].

Оптическая конструкция камеры iXM-RS280F аналогична предыдущей модели крупноформатной камеры iXU-RS1900 [2]. Но она обеспечивает получение объединенного снимка (изображения) в центральной проекции размером в 280 Мпикселей за счет оптической интеграции двух изображений в 150 Мпикселей каждый, полученных в надире, и специального программного обеспечения (рис. 1).

Камера iXM-RS280F состоит из двух объективов с фокусным расстоянием 90 мм и двух матриц изображения КМОП с размером пикселей 3,76 мкм, смещенных наружу относительно оптической оси правого объектива вправо, а левого — влево. Объективы ориентированы вертикально, обеспечивая получение изображения в надир с одинаковым разрешением на местности. Каждая матрица изображения фиксирует

противоположную сторону от линии полета — правая матрица фиксирует левую сторону, а

левая — правую сторону. Между изображениями имеется область перекрытия для сшивки

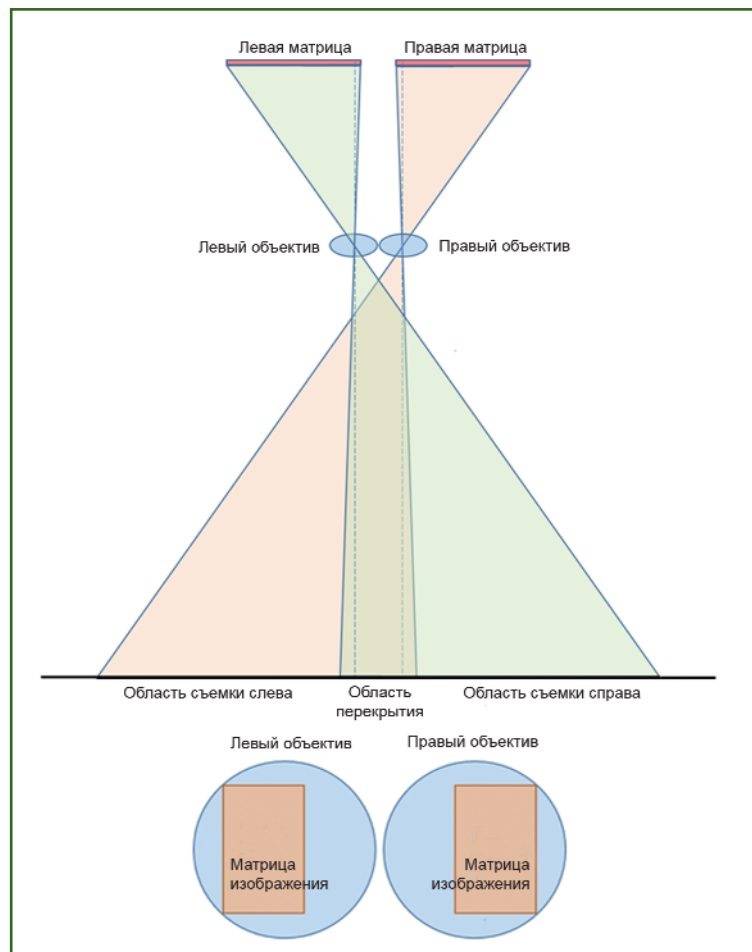


Рис. 1

Оптическая схема работы крупноформатной камеры iXM-RS280F

Вычисленные параметры калибровки левого и правого объективов камеры iXM-RS280F (№ YZ000021)

Таблица 1

| Правый объектив (левое изображение) Матрица № YU000023 Объектив № 12553907 | | | Левый объектив (правое изображение) Матрица № YU000026 Объектив № 12553903 | | |
|--|--------------|-------------|--|--------------|-------------|
| Параметры | Значения | СКО | Параметры | Значения | СКО |
| C , мм | 89,6571 | 0,0042 | C , мм | 89,4370 | 0,0042 |
| X_p | 17,8545 | 0,0006 | X_p | 18,1519 | 0,0006 |
| Y_p | -0,0801 | 0,0005 | Y_p | -0,1327 | 0,0005 |
| K_1 | 7,26672e-06 | 2,49765e-09 | K_1 | 7,38137e-06 | 2,59021e-09 |
| K_2 | -3,20337e-10 | 2,33575e-12 | K_2 | -2,72361e-10 | 2,39663e-12 |
| K_3 | -3,61466e-14 | 7,71167e-16 | K_3 | -4,75150e-14 | 7,81818e-16 |
| P_1 | 1,06174e-06 | 1,37210e-08 | P_1 | 9,30333e-07 | 1,39095e-08 |
| P_2 | 2,50146e-07 | 1,00382e-08 | P_2 | 2,94352e-06 | 1,00580e-08 |
| B_1 | -4,48326e-05 | 5,84218e-07 | B_1 | -3,18749e-05 | 5,90834e-07 |
| B_2 | -3,24103e-05 | 4,61722e-07 | B_2 | -1,06894e-05 | 4,63518e-07 |

Примечания:

СКО — среднее квадратическое отклонение;

C — фокусное расстояние объектива;

X_p , Y_p — координаты оптического центра снимка;

K_1 , K_2 , K_3 — коэффициенты радиальной дисторсии;

P_1 , P_2 — коэффициенты тангенциальной дисторсии;

B_1 , B_2 — коэффициенты разнофокусности по осям.

изображений. Матрицы изображения устанавливаются длинной стороной вдоль линии полета. Каждая матрица обеспечивает получение изображения размером 10 652 пикселей поперек линии полета и 14 204 пикселей вдоль линии полета. Два сшитых изображения образуют большой снимок размером 20 150 пикселей (поперек линии полета) и 14 118 пикселей вдоль линии полета, обеспечивая получение изображения в 280 Мпикселей. Общее поле зрения поперек линии полета составляет 45,7°, а вдоль — 32,9°.

▼ Процедура воздушной калибровки камеры iXM-RS280F

Фотограмметрическая калибровка камеры может быть выполнена двумя способами: способом воздушной калибровки и в лабораторных условиях.

Процедура воздушной калибровки камеры iXM-RS280F включает следующие этапы:

1. Подготовка к полету и его выполнение над испытательным полигоном.

2. Уравнивание блока, состоящего из независимых левых и правых изображений.

3. Измерение опорных точек на всех изображениях и уравнивание блока с использованием всех опорных точек.

4. Получение параметров калибровки левого и правого объективов камеры и параметров их взаимного ориентирова-

ния. Эти данные записываются в заголовок файла изображения.

5. Использование программы iX Capture для создания исправленных за дисторсию больших изображений, объединенных из левого и правого изображений.

07 июня 2020 г. были выполнены калибровочные испытания камеры iXM-RS280F (№ YZ000021) с двумя объективами типа Rodenstock RS с фокусным рас-

Взаимное ориентирование левых и правых снимков (в системе координат Australis), полученных камерой iXM-RS280F (№ YZ000021)

Таблица 2

| Исследуемые параметры | Значения |
|-----------------------|-----------|
| X , мм | -0,101100 |
| Y , мм | 0,000079 |
| Z , мм | 0,000065 |
| Ω , ° | 0,000065 |
| Φ , ° | 0,024478 |
| κ , ° | -0,039605 |

Параметры калибровки камеры iXM-RS280F (№ YZ000021) для объединенного изображения

Таблица 3

| Параметр | Значение |
|---|---------------------|
| Размер изображения, пиксель/Мпиксель | 20 150 x 14 118/280 |
| Размер пикселя, $\mu\text{м}$ | 3,76 |
| Номинальное фокусное расстояние, мм | 90 |
| Фокусировка, м | Бесконечность |
| Фактическое фокусное расстояние, мм | 89,6571 |
| СКО определения фокусного расстояния, мм | 0,0042 |
| $X_p, Y_p, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, B_1, B_2$ | 0 |

Результаты типичного одновременного уравнивания блока левых и правых изображений

Таблица 4

| Характеристики | Значения |
|--|----------|
| Количество связующих точек (на земле) | ~91 000 |
| Количество проекций связующих точек (на изображении) | ~400 000 |
| Количество опорных точек | 45 |
| Среднее количество снимков на одну опорную точку | 18 |
| СКО _{xуz} , см | 1,5–2,5 |

стоянием 90 мм и двумя матрицами для получения изображений размером 10 652x14 204 пикселей каждой из них.

По результатам воздушной калибровки были вычислены параметры калибровки левого и правого объективов камеры, приведенные в табл. 1, а также параметры взаимного ориентирования левых и правых снимков (табл. 2).

При создании объединенного (большого) изображения в программе iX Capture, фактическое фокусное расстояние камеры iXM-RS280F принималось равным фокусному расстоянию правого объектива, полученному в результате калибровки, — 89,6571 мм (см. табл. 1), а все остальные параметры ($X_p, Y_p, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, B_1$ и B_2) — равными нулю (табл. 3).

▼ Испытательный полигон

На испытательном полигоне размером 2,0x1,2 км было закреплено 53 опорные точки (рис. 2). Координаты всех

опорных точек определялись в режиме «статика» двумя независимыми получасовыми сеансами GPS-наблюдений относительно одной и той же базовой станции. Координаты этой станции были вычислены двумя независимыми сеансами наблюдений продолжительностью 1 час относительно постоянно действующей базовой станции GPS CSAR. В результате плано-

вые координаты опорных точек были получены с СКО_{xу} = 0,8 см, а высоты — с СКО_z = 1,3 см.

▼ Калибровочный полет и уравнивание блока левых и правых изображений

Калибровочный полет включал 11 маршрутов в продольном направлении (СЮ) и 2 маршрута в поперечном направлении (ЗВ), которые выполнялись со следующими параметрами:



Рис. 2

Расположение опорных точек на испытательном полигоне



Рис. 3
 Схема типичного уравнивания блока левых и правых изображений

- наземное разрешение — 4,8 см;
- высота полета — 1145 м;
- поперечное перекрытие для объединенных изображений — 80%;
- поперечное перекрытие для левых/правых изображений — 60%;
- продольное перекрытие — 73%;
- расстояние между маршрутами — 193 м;
- расстояние между снимками в маршруте 183 м;
- размер объединенного снимка — 967х678 м;
- количество изображений — 110.

Блок из левых и правых изображений уравнивался одновременно с использованием всех опорных точек, измеренных на всех снимках. Схема и результаты типичного одновременного уравнивания блока левых и правых изображений

приведены на рис. 3 и в табл. 4.

В результате уравнивания были получены параметры калибровки левого и правого объективов камеры по отдельным изображениям (см. табл. 1) и параметры взаимного ориентирования левых и правых снимков (см. табл. 2), которые использовались для создания объединенных изображений, исправленных за дисторсию.

▼ **Остаточная дисторсия после учета параметров калибровки**

При создании объединенных неискаженных изображений соответствующие параметры калибровки объективов камеры применялись отдельно для левого и правого изображений (рис. 4). Максимальная остаточная дисторсия на неискаженных одиночных и объединенных изображениях составила менее 0,2 пикселя (<0,7 мкм).

▼ **Оценка точности аэотриангуляции**

Созданные объединенные изображения для проверки их точности были уравнены в трех новых блоках аэотриангуляции.

Первый блок включал все объединенные изображения с одиннадцати продольных и двух поперечных маршрутов съемки (11 + 2). Второй блок был составлен из каждого третьего продольного маршрута и двух поперечных (6 + 2). Третий блок состоял только из каждого третьего продольного маршрута (6). Во всех блоках при уравнивании использовались 7 опорных точек для внешнего ориентирования и 38 контрольных точек для оценки точности уравнивания блока (рис. 5). Результаты уравнивания всех блоков представлены в табл. 5.

▼ **Анализ точности стереоизмерений**

Для проверки точности стереоизмерений был выполнен

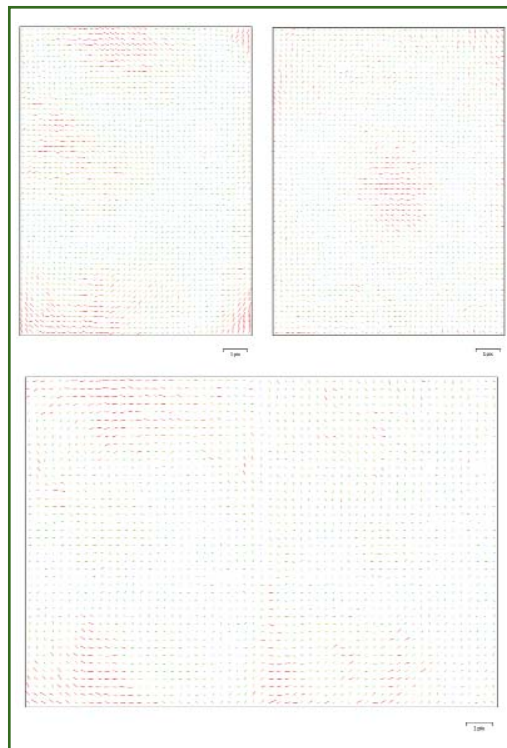


Рис. 4
 Неискаженные левое и правое изображения (вверху) и неискаженное объединенное изображение (внизу)

Результаты оценки точности уравнивания трех новых блоков аэротриангуляции

Таблица 5

| Характеристики блока | Значения | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| | Первый блок | Второй блок | Третий блок |
| Поперечное / продольное перекрытие, % | 80 / 73 | 60 / 73 | 60 / 73 |
| Количество объединенных изображений | 110 | 70 | 48 |
| Количество опорных / контрольных точек | 7 / 38 | 7 / 38 | 7 / 38 |
| Точность на 7 опорных точках | | | |
| СКО _x , см | 2,6 | 2,4 | 2,3 |
| СКО _y , см | 4,0 | 3,8 | 3,9 |
| СКО _z , см | 1,2 | 0,8 | 0,5 |
| Точность на 38 контрольных точках | | | |
| СКО _x , см | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| СКО _y , см | 3,4 | 3,4 | 3,6 |
| СКО _z , см | 4,4 | 4,3 | 4,7 |

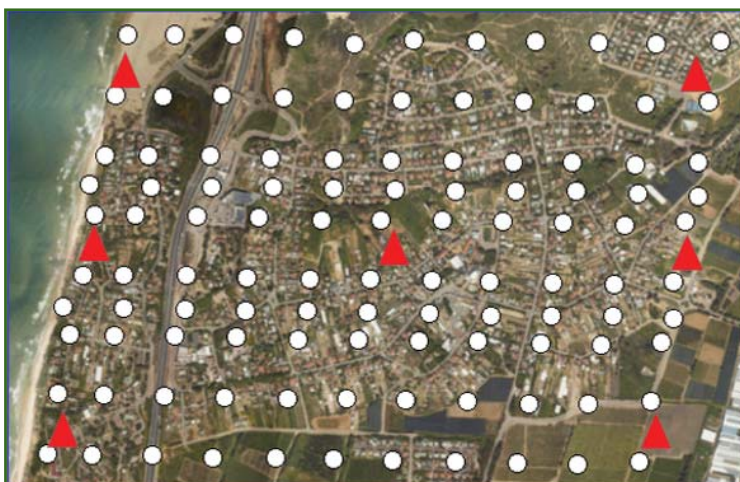


Рис. 5
Расположение 7 опорных точек и 38 контрольных точек на испытательном полигоне

полет, включающий 12 маршрутов в продольном направлении (СЮ) и 2 маршрута в поперечном направлении (ЗВ), со следующими параметрами:

- наземное разрешение — 2,1 см;
- поперечное перекрытие для объединенных изображений — 73 %;
- продольное перекрытие — 60 %;
- количество изображений — 251.

Во время тестирования использовалось 45 опорных

точек, и было измерено 325 стереопар. На одну опорную точку в среднем приходилось 7,3 стереопары. Полученная точность стереоизмерений составила: СКО_x — 2,4 см, СКО_y — 2,2 см и СКО_z — 4,1 см.

Итоги калибровочных испытаний камеры iXM-RS280F

Таким образом, воздушная калибровка крупноформатной камеры iXM-RS280F и оценка точности полученных результатов показали следующее:

- iXM-RS280F является метрической камерой со стабильными и четко определяемыми параметрами калибровки;

- изображения, полученные камерой, имеют высокое геометрическое и радиометрическое качество, что позволяет использовать ее в проектах высокоточного картографирования, включая стереовекторизацию;

- фотограмметрическая точность блока составляет около 0,5 пикселя в плоскости изображения;

- точность на контрольных точках соответствует 0,7 пикселя в плане и 1 пиксель по высоте;

- точность стереоскопических измерений для блока из снимков с наземным разрешением 2,1 см составляет 1 пиксель в плане и 2 пикселя по высоте.

Список литературы

1. Райzman Ю.Г. PhaseOne PAS280MP — новый крупноформатный аэросъемочный комплекс // Геопрофи. — 2020. — № 3. — С. 36–40.
2. Райzman Ю.Г. Принципы съемки и анализ производительности аэросъемочной системы PAS190MP // Геопрофи. — 2018. — № 5. — С. 38–43.