

# БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

## Часть 2. Модель обработки аэрофотоснимков в среде AGISOFT PHOTOSCAN

Рассмотренная ниже модель фотограмметрической обработки цифровых данных, полученных с любого носителя съемочной аппаратуры, используется для решения широкого спектра задач, связанных с реконструкцией антропогенных и природных объектов и построением по цифровым снимкам 3D-моделей для архитектуры, топографии и многих иных областей науки и техники.

Одной из задач фотограмметрической обработки снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата, является топографическое обеспечение территории, и в частности — определение пространственных координат (X, Y, Z) большого числа точек в системе координат местности, построение по ним цифровых нерегулярных (TIN) и регулярных (DEM) моделей поверхности, а на их основе — текстурированных моделей местности и ортофотопланов.

Обработка снимков в целях топографического обеспечения включает ряд последовательно выполняемых операций, часть которых реализуется современными методами машинного зрения и базируется на использовании аппарата проективной геометрии, однородных координат и фотометрической обработки изображений:

- выбор и отождествление на снимках соответственных точек;

- построение фотограмметрических моделей;
- уравнивание координат точек сети;
- построение цифровых моделей рельефа и текстурированных моделей местности.

Все вычисления выполняются в автоматическом режиме, в соответствии с заданными параметрами и установками. В исключительных случаях допускается вмешательство оператора и выполнение некоторых действий в неавтоматизированном (ручном) режиме.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Исходными данными для фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БПЛА служат аэрофотоснимки в одном из принимаемых системой форматов, геодезические данные о местности и параметры съемочной камеры.

**Загрузка аэрофотоснимков** в систему осуществляется из папки, куда они предварительно помещены после завершения аэрофотосъемки, выполненной с использованием цифровой камеры. Единственное требование к таким аэроснимкам — достаточно высокое (5 Мп и более) разрешение изображения. Определение в процессе обработки снимков параметров калибровки камеры (в том числе коэффициентов радиальной и тангенциальной

дисторсии) открывает возможность использования как специализированных, так и неметрических камер.

**Геодезические данные о местности** могут быть представлены либо расстояниями между опознанными на аэроснимках точками, либо их пространственными положениями в системе координат местности. В первом случае программа ограничится приведением построенной фотограмметрической модели к заданному масштабу, а во втором — ее геодезическим ориентированием, построением ортофотопланов, цифровых и текстурированных моделей местности [1].

В качестве опорных допустимо использование зафиксированных в поле координат центров фотографирования и (или) точек полевой подготовки (привязки аэроснимков), каждая из которых должна иметь пространственные координаты X, Y, Z. Точность представления координат должна обеспечивать возможность выполнения требований к качеству обработки снимков, а в случае использования их при создании топографической основы для выполнения тех или иных работ — требованием соответствующих нормативных документов.

Фрагмент файла навигационных данных, полученных соответствующей аппаратурой БПЛА, представлен в таблице.

№ п/п	Номер снимка	Широта В, °	Долгота L, °	Высота Н, м	Крен, °	Тангаж, °	Курс, °
26	fly1DSC07163.jpg	60,411651	30,272992	245,831417	-02,300000	-02,400000	336,500000
27	fly1DSC07164.jpg	60,412160	30,272543	243,431417	-03,000000	-05,600000	336,300000
28	fly1DSC07165.jpg	60,412707	30,272089	243,431417	-01,400000	-06,500000	338,800000
29	fly1DSC07166.jpg	60,413248	30,271690	243,931417	-02,500000	-05,800000	341,200000
30	fly1DSC07167.jpg	60,413786	30,272332	243,731417	-00,800000	-04,900000	341,500000
31	fly1DSC07168.jpg	60,414331	30,270963	243,431417	00,800000	-05,100000	341,400000
32	fly1DSC07169.jpg	60,414841	30,270594	242,431417	-02,600000	-05,100000	338,800000
33	fly1DSC07170.jpg	60,415354	30,270192	242,331417	-02,900000	-06,900000	339,400000
34	fly1DSC07171.jpg	60,415873	30,269822	242,131417	00,500000	-06,400000	341,900000

Заметим, что точность «сырых» координат центров фотографирования может составить 5–10 метров, а пост-обработка результатов спутниковых и инерциальных измерений повышает точность их определения до 3–5 сантиметров, что позволяет в дальнейшем получить элементы внешнего ориентирования снимков и выполнить фотограмметрическое сгущение на разреженном полевом геодезическом обосновании.

**Параметры калибровки камеры** обеспечивают связь координат точки местности (объекта, сцены) с ее положением на цифровом изображении.

На рисунке (рис. 1) приведена схема получения изображения  $m$  точки местности  $M$  с помощью идеального объектива с фокусным расстоянием  $f$ . Определим три координатные системы: две плоских ( $o'uv$ ;  $oxy$ ) и пространственную  $SXYZ$  с взаимно параллельными осями абсцисс и ординат. Их начала  $o'$ ,  $o$  и  $S$  совместим с левым верхним углом изображения, главной точкой снимка и узловой точкой объектива.

Для этого случая координаты точек  $M(X, Y, Z)$  и ее изображения на снимке  $m(x, y)$  связаны зависимостями

$$x = f \frac{X}{Z}, \quad y = f \frac{Y}{Z}. \quad (1)$$

При регистрации изображения на ПЗС-матрицу  $P$  измерение координат осуществляется в системе  $ou'v$  с началом в центре левого верхнего пиксела и в единицах фотоприемника (пикселах).

С учетом этого связь однородных координат точки  $m$  в единицах практически любого фотоприемника можно представить в следующем виде [2]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{или} \\ \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $u, v, x_0, y_0$  — координаты наблюдаемой точки  $m$  и главной точки снимка  $o$  в системе  $o'uv$  ПЗС-матрицы;

$x', y', x, y$  — координаты точки  $m$  в системе  $oxy$ , искаженные влиянием

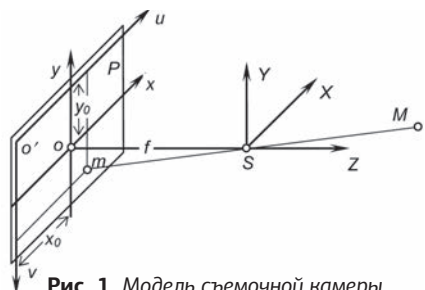


Рис. 1. Модель съемочной камеры

дисторсии объектива и свободные от этого влияния;

$f_x, f_y$  — проекции фокусного расстояния камеры на координатные оси системы  $SXYZ$ ;

$s$  — параметр, определяющий угол скоса пиксела;

$K$  — матрица внутренней калибровки камеры. Все линейные величины задаются в пикселах.

Следствием отклонений оптической системы объектива от идеальной является его дисторсия, для описания которой в фотограмметрической практике широко используется модель Брауна, в ней измеренные координаты  $(x', y')$  связаны с неискаженными  $(x, y)$  следующими зависимостями [3]:

$$\begin{cases} x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + \\ + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \end{cases}, \quad (3)$$

где  $r^2 = x^2 + y^2$ ;  $k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты радиальной дисторсии;

$p_1, p_2$  — коэффициенты тангенциальной дисторсии.

Если координатные оси промежуточной системы  $SXYZ$  параллельны координатным осям системы координат местности, то необходимо учесть смещение центра проектирования  $S$  и вращение связи проектирующих лучей на углы  $\alpha, \omega$  и  $\chi$ . В этом случае говорят о параметрах полной калибровки камеры, а формулы (2) примут вид:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $a_i, b_i, c_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — компоненты матрицы ортогонального преобразования при повороте координатной системы  $SXYZ$  на углы  $\alpha, \omega$  и  $\chi$ ;

$X_S, Y_S, Z_S$  — координаты центра фотографирования  $S$  в системе координат местности.

Воспользовавшись формулами связи однородных  $m(u, v, s)$  и декартовых  $m(x, y)$  координат:

$$x = u/s, \quad y = v/s,$$

от формул (4) легко перейти к известным формулам классической фотограмметрии.

В большинстве случаев параметры съемочной камеры неизвестны, и их

определение является одной из задач программы Photoscan. В этом случае достаточно задать их начальное значение, в качестве которого программа автоматически примет данные EXIF (Exchangeable Image File Format), содержащего значение  $f$ , разрешение снимка в пикселах, размер пиксела и др.

В дальнейшем, в процессе обработки, параметры калибровки будут уточнены и дополнены.

### ВЫБОР СООТВЕТСТВЕННЫХ ТОЧЕК

Автоматический поиск соответственных точек снимков включает:

- масштабно-инвариантное определение особых точек на изображении;
- ориентационно-инвариантное описание окрестностей выбранных особых точек (вычисление дескрипторов особых точек);
- идентификация соответственных точек на перекрывающихся снимках путем выявления схожих дескрипторов;
- исключение ложных соответственных точек на основе определения максимального самосогласованного множества.

В качестве особых точек изображений рассматриваются экстремумы яркости снимка. Цветовые компоненты снимка не принимаются во внимание, так как условия освещения могут существенно влиять на цветопередачу фотоаппарата. Для достижения масштабной инвариантности особые точки определяются как на исходном изображении, так и в пирамиде масштабов этого изображения (уменьшение разрешения с шагом 2).

Дескрипторы особых точек — это описание «формы яркости» изображения в окрестности особой точки. При вычислении дескриптора выполняют:

- определение с субпиксельной точностью координат экстремума яркости в системе координат кадра;
- определение на исходном изображении направления наибольшего градиента в окрестности экстремума яркости;
- ориентирование окрестности экстремума исходного изображения в направлении наибольшего градиента, чем достигается ориентационная инвариантность описания особой точки;
- запись формы яркости в дескриптор, ориентированной в направлении наибольшего градиента окрестности особой точки (как правило, размером  $16 \times 16$  пикселей).

Определение дескрипторов в пирамиде масштабов исходного изображения, исключение при вычислениях дескриптора цветового компонента и ориентирование окрестности экстремума в направлении наибольшего градиента позволяют получить дескриптор особой точки изображения поверхности объекта, в широких пределах инвариантный относительно ракурса съемки, расстояния до объекта и условий освещения объекта.

Выбор соответственных точек (точечных особенностей) по площади изображения осуществляется максимально равномерно (рис. 2), что дает возможность эффективно обрабатывать сцены с неравномерной контрастностью. Число таких точек на каждом снимке (как правило, в пределах 20–40 тыс.) задается оператором.

При выборе соответственных точек на цветных и монохромных изображениях (которые в большинстве случаев получены с использованием одноматричных камер) анализируются все цветовые каналы совместно. В случае работы с мультиспектральными изображениями (они зачастую формируются с помощью многоматричных камер и не соответствуют в строгом смысле центральной проекции), пользователь имеет возможность выбрать основной канал, который будет использован отдельно.

Для ускорения процесса сопоставления особенностей между парами кадров в программе предусмотрены различные режимы предварительного отбора потенциально перекрывающихся пар (например, на основе измеренных в полете координат центров фотографирования, грубого анализа содержимого самих изображений в автоматическом режиме и др.).

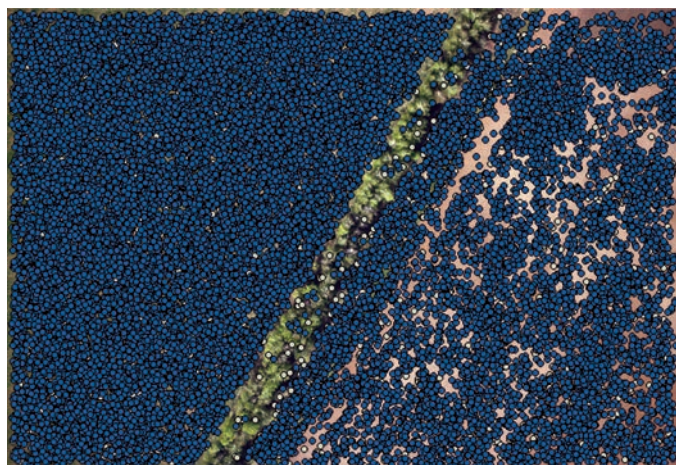


Рис. 2. Фрагмент изображения с нанесенными на него особыми точками

Поскольку описанный метод позволяет найти в области перекрытия изображений тысячи и десятки тысяч похожих точек, появляется возможность автоматически, с использованием статистических методов, исключить ложные соответствия. Для этого из найденных соответствий формируется множество случайных выборок, для которых определяется максимальное множество самосогласованных соответствий (таких, в которых ошибка репроецирования не превышает заданного значения, по умолчанию 0,5 пиксела). Этот подход позволяет исключить участие оператора в проверке найденных соответствий.

### ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

В результате выполнения предыдущей операции создано облако точек, каждая из которых идентифицирована на всех снимках, где она изобразилась, и создан некий граф, определяющий положение каждого снимка на обрабатываемой территории.

Последующие вычисления связаны с построением модели объекта в виде совокупности точек с пространственными координатами в заданной системе местности. Реализованная на этом этапе логика вычислений базируется на использовании полученного ранее облака точек и многократного повторения сравнительно несложных операций по построению одиночной модели с жесткой привязкой ее к системе координат местности.

Вычисления начинаются с пары снимков в центре участка (2.2–2.3, рис. 3). Следующий снимок, выбирае-

мый для обработки, должен примыкать к уже построенной модели участка, иметь с ней максимальное перекрытие и, возможно, большее число идентичных точек (в порядке 2.1, 2.4, 1.2, 1.3, 3.2, 3.3, 1.1, 1.4 и т.п., рис. 3).

#### Основной блок вычислений

включает операции, повторяемые в каждом цикле обработки: взаимное ориентирование стереопары, определение условных угловых элементов внешнего ориентирования правого снимка, ориентации базисной системы координат и вычисление фотограмметрических координат точек модели.

**1. Взаимное ориентирование снимков** выполняется в линейно-угловой системе, исходя из условия компланарности соответственных векторов.

Полагая, что неравенство нулю их векторно-скалярного произведения является следствием влияния как элементов взаимного ориентирования  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\chi$   $\delta\tau$  и  $\delta\nu$ , так и погрешностей параметров внутренней калибровки камеры, запишем исходное уравнение в виде:

$$\varphi(\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\chi, \Delta\tau, \Delta\nu, P_k) = 0, \quad (5)$$

где  $P_k$  — параметры внутренней калибровки камеры согласно равенствам (2) и (3).

Приведение уравнения (5) к линейному виду и использование метода наименьших квадратов приводит к десяти нормальным уравнениям, решение которых дает искомые элементы взаимного ориентирования и поправки к параметрам самокалибровки.

При обработке второй и последующих стереопар (2.3–2.4, 2.2–1.2 и др., рис. 3) для всех точек, размещенных в соот-

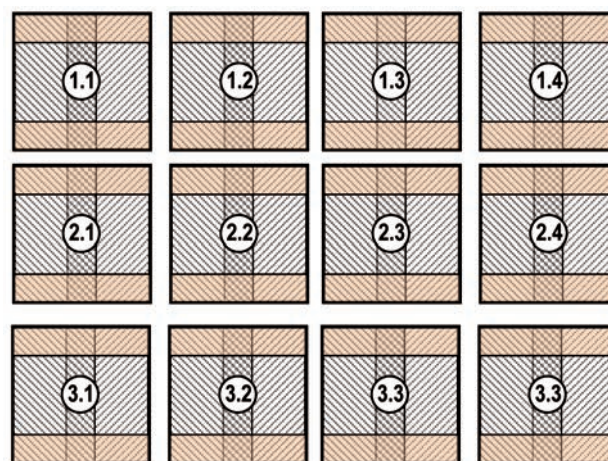


Рис. 3. К построению трехмерной модели местности (штриховкой показаны зоны продольного перекрытия снимков, а розовой заливкой — поперечного перекрытия)



Markers	X err (m)	Y err	Z err	Error (m)	Projections	Error (pix)
100002	-0.034994	-0.007552	-0.026530	0.044558	9	0.397
100003	0.009710	-0.010726	-0.018251	0.023290	5	0.518
100004	-0.016119	-0.002272	-0.020973	0.026549	9	0.465
100005	0.083614	0.044398	0.149849	0.177249	5	0.858
100006	0.061461	0.008241	0.059293	0.085797	9	0.667
100008	0.008960	0.015139	-0.041983	0.045520	9	0.486
100009	-0.008363	0.036957	0.108290	0.114727	12	0.578
100010	0.014351	0.037097	0.056129	0.068794	13	0.580
100011	-0.026050	0.007057	0.023263	0.035632	8	0.562
100012	-0.009735	-0.009242	-0.020175	0.024233	10	0.449
100013	-0.008583	-0.003780	-0.041985	0.043019	6	0.452
100014	0.023509	-0.034939	-0.029701	0.051532	11	0.403
100015	-0.021088	0.089621	0.021348	0.092540	5	0.649
100016	0.032196	-0.042326	-0.009456	0.054014	8	0.375
100017	-0.020309	-0.113483	0.046760	0.134408	4	0.359
100018	-0.049839	0.017657	-0.069299	0.087166	10	0.732
100019	-0.059575	0.005166	-0.070882	0.092737	4	0.553
100025	-0.004350	-0.007586	0.025109	0.026588	9	0.453
100026	0.049349	-0.034442	-0.079396	0.099626	12	0.507
<b>Total Error</b>	<b>0.032859</b>	<b>0.020179</b>	<b>0.042708</b>	<b>0.057540</b>		<b>0.519</b>

Рис. 4. Оценка точности результатов уравнительных вычислений



Рис. 5. Фрагмент текстурированной трехмерной модели местности

ветствующем перекрытии, добавляются условия равенства длин проектирующих лучей, полученных при обработке текущей и предыдущих моделей. Это условие содержит поправки к 11 неизвестным (элементам взаимного ориентирования, базису фотографирования, параметрам калибровки камеры) и имеет вид:

$$\psi(\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\chi, \Delta\tau, \Delta\nu, \Delta b, P_k) = 0, \quad (5a)$$

а уточненное значение базиса фотографирования используется для определения фотограмметрических координат точек текущей модели.

**2. Угловые элементы внешнего ориентирования правого снимка** и компоненты базиса фотографирования определяются по элементам матриц ортогонального преобразования  $A_{\alpha_n, \omega_n, \chi_n}^T$  и  $A_{\tau, \nu}^T$ , соответственно, найденных из выражений:

$$A_{\alpha_n, \omega_n, \chi_n}^T = A_{\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\chi}^T \times A_{\alpha_n, \omega_n, \chi_n}^T$$

$$A_{\tau, \nu}^T = A_{\tau, \nu}^T \times A_{\alpha_n, \omega_n, \chi_n}^T$$

При построении первой модели матрица  $A_{\alpha_n, \omega_n, \chi_n}^T$  соответствует единичной, а для последующих ее компоненты определяются в предыдущем цикле вычислений.

**3. Фотограмметрические координаты точек модели и правого центра** определяют по формулам прямой засечки, с предварительным трансформированием координат ответственных точек левого и правого снимков по условным угловым элементам их внешнего ориентирования. Используемое при этом значение базиса фотографирования в первой модели определяется из решения обратной геодезической задачи по ближайшим центрам фотографирования с известными координатами, а для последующих моделей — находится из решения системы уравнений (5) и (5a).

По завершении рассмотренного вычислительного цикла для текущей стереопары выполняется репроецирование точек, изображенных на обработанных к этому моменту снимках, с использованием уточненных координат центров и параметров внутренней калибровки. Это позволяет локализовать накопление погрешностей, вызванных постепенным «нализыванием» текущей модели на ранее обработанные, и тем самым обеспечить равномерную точность сети.

Далее выбирается очередной снимок (см. рис. 3), и рассмотренный выше вычислительный процесс повторяется, начиная с взаимного ориентирования очередного снимка с одним из ранее использовавшихся.

**Уравнивание связей проектирующих лучей с самокалибровкой** на основе уравнений коллинеарности, вытекающих из (4) с учетом (3), выполняется после завершения рассмотренного выше вычислительного цикла. При этом уравнивании используются все имеющиеся данные — координаты центров фотографирования, измеренные навигационным оборудованием углы ориентации снимков, геодезические координаты опорных пунктов (пункты полевой привязки) и др. с учетом их весовых коэффициентов, а неизвестными являются элементы внешнего ориентирования всех снимков блока, координаты всех определяемых точек и параметры самокалибровки.

Все этапы вычислительного процесса сопровождаются оценкой точности, для чего исследуются значения остаточных поперечных параллаксов (при взаимном ориентировании), расхождения координат в зонах перекрытий (при построении модели), остаточные невязки на опорных и контрольных точках (при заключительном уравнивании, рис. 4) и пр.

## СОЗДАНИЕ ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

В результате фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки получают три основных вида готовой продукции: трехмерные текстурированные полигональные модели местности, ортофотопланы в заданной картографической проекции, а также цифровые модели местности аналогичные TIN и/или DEM.

Трехмерные текстурированные полигональные модели служат основой для трехмерного моделирования в архитектуре и строительстве (рис. 5). В модели могут быть произведены пространственные расчеты, смоделированы зоны распространения радиоволн, загрязнения, наводнения и т.п.

Ортофотопланы могут быть использованы при изготовлении топографических планов и карт, для чего они экспортируются в специализированные программные средства (например, AutoCAD).

Цифровые модели местности TIN и DEM могут быть применены в системах объемного проектирования (AutoCAD, MicroStation) и в геоинформационных системах (MapInfo, ArcGis и пр.).

### Литература:

1. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan Professional Edition, версия 0.9.1. Электронный ресурс: [www/photoscan.ru](http://www/photoscan.ru).
2. Форсайт А. Дж. Компьютерное зрение. Современный подход. М., «Вильямс», 2004.
3. Антипов И. Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. М., Картоцентр-Геодезиздат, 2003.