

К МЕТОДИКЕ ПОЛУЧЕНИЯ ВНЕШНЕТРАЕКТОРНЫХ ДАННЫХ В АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

С. И. Герасимов^{1,3}, В. И. Костин¹, В. А. Кикеев², М. А. Хайруллин¹

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»;

²НГТУ им Р. Е. Алексеева;

³СарФТИ НИЯУ МИФИ

Оценивается возможность применения современных цифровых камер для решения задач ВТ ФГИ путем использования полупрофессиональной съемочной аппаратуры средней сложности и стоимости (*Canon EOS-IDs* и *Kodak DCS Pro SLR/n*). Для создания на основе этих камер ЦФСП требовалось: модернизировать цифровые неметрические камеры для фотосъемки в ОИК с близкого расстояния и обеспечить возможность проведения аттестации технических характеристик; адаптировать камеры в точный инструмент фотограмметрических измерений: разработать методическое и программно-математическое обеспечение фотограмметрической калибровки; произвести метрологическую аттестацию камер путем фотограмметрической калибровки технических характеристик; разработать вспомогательное оборудование, произвести монтаж, настройку и юстировку по уточнению координат положения и угловой ориентации камер ЦФСП в системе координат ОИК; выполнить экспериментальные исследования применения ЦФСП в реальных условиях использования при осуществлении ВТ ФГИ.

При создании ЦФСП: были разработаны рабочий макет фотограмметрического калибровочного стенда и метод калибровки камер, при котором фотографирование поля опорных точек каждой отдельной камерой производится независимо с 4 точек пространства; выполнена фотограмметрическая калибровка и паспортизация цифровых неметрических камер; произведена сборка оснастки и технологического оборудования, монтаж, настройка и юстировка ЦФСП; осуществлена экспериментальная проверка ЦФСП в плановых испытаниях в ряде аэробаллистических экспериментов в ОИК; выполнены оценки точности ВТ ФГИ, в том числе и сопоставление полученных результатов с данными штатной системы аналогового стереопоста.

Ключевые слова: аэробаллистический эксперимент, внешнетраекторные данные.

Решение современных задач экспериментальной аэробаллистики нуждается в точных внешнетраекторных данных как исходных материалах для определения аэродинамических характеристик. Для соответствия этим задачам к оптическому измерительному комплексу аэробаллистического тира [1] предъявляются все более высокие требования. Постепенное вытеснение из современного съемочного процесса аналоговой аппаратуры цифровыми камерами, принявшее в настоящее время необратимый характер, обуславливает модернизацию оптико-измерительного комплекса (ОИК) путем замены морально и физически устаревших традиционных средств внешне-

траекторной регистрации – широкоугольных камер АФА-41/100 на современную цифровую фотоаппаратуру.

Доработка и адаптация цифровых неметрических камер применительно к использованию в ОИК

Общие замечания

Основное требование к неметрическим цифровым камерам типа Canon EOS-IDs, которыми планируется оснастить оптический измерительный комплекс ОИК, – обеспечение внешнетраек-

торных фотограмметрических измерений, не уступающих по точности используемым штатным оптическим средствам – фотограмметрическим камерам АФА-41/100.

В том виде, в каком эти камеры выпускаются промышленностью, они не могут быть использованы в ОИК для производства фотограмметрических съемок с близкого расстояния. Отвечая профессиональному уровню, но не фотограмметрическому назначению, неметрические цифровые камеры являются камерами с переменным фокусным расстоянием, в то время как для создания стационарных цифровых фотограмметрических стереопостов (ЦФСР) в ОИК требуются камеры с фиксированным фокусом. Здесь возникает ряд проблем, связанных с превращением неметрической камеры в инструмент для точных фотограмметрических измерений. Это – доработка и адаптация камер применительно к задачам и условиям их использования.

Доработка и адаптация включают два основных этапа:

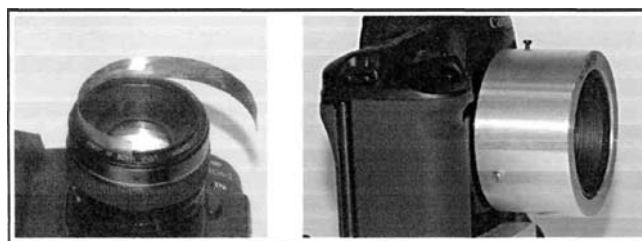
– юстировку камеры, в процессе которой определяется и устанавливается эквивалентное фокусное расстояние, т. е. наилучшая фокусировка камеры, соответствующая наилучшему наблюдаемому зрительно разрешению, с последующей фиксацией промежуточного положения фокусировки объектива в камере;

– фотограмметрическую калибровку камеры, в процессе которой осуществляется метрологическая аттестация камеры, при которой определяются индивидуальные фотограмметрические характеристики цифровой камеры, превращающие ее в точный инструмент фотограмметрических измерений.

Доработка цифровых фотокамер

Применительно к условиям использования цифровых камер в ОИК целью модернизации является фокусировка камеры на близкое расстояние с учетом выбора оптимальных значений переднего и заднего плана границ резкости. После фокусировки объектива в данном положении производилась его жесткая фиксация. Для этого, с помощью специально подобранного ленточного уплотнительного кольца (рис. 1,а), устранялись зазоры и люфты между оправой объектива и подвижным фокусирующим элементом (фокусирующей линзой).

С целью предотвращения расфокусировки камеры, из-за случайных механических или динамических воздействий на камеру, на объектив устанавливалась цилиндрическая оправка (рис. 1,б), блокирующая смещение и вращение фокусирующего кольца объектива.



а

б

Рис. 1. Фиксация объектива камеры после перефокусировки: а – уплотнительная лента-кольцо; б – цилиндрическая оправка для блокировки смещения объектива

Обеспечение постоянства фокусировки камеры для заданных условий съемки обуславливает возможность проведения фотограмметрической калибровки. При этом гарантируется неизменность (постоянство во времени) фотограмметрических параметров цифровой камеры.

Фотограмметрическая калибровка цифровых камер

Фотограмметрическая калибровка представляет собой процесс аттестации цифровой фотокамеры, в результате которого определяются ее индивидуальные технические характеристики. Эти характеристики включают геометрические константы, известные под названием элементов внутреннего ориентирования.

При калибровке должна быть получена количественная информация об объективе и его связи с фокальной плоскостью фотокамеры, рассчитано такое значение фокусного расстояния, которое обеспечивает наилучшее распределение радиальной дисторсии применительно к предполагаемому использованию фотокамеры.

Вопрос калибровки цифровых камер практически легко решается, хотя следует отметить достаточно высокую трудоемкость этого процесса. Если при калибровке фотокамера должна строго ориентироваться относительно фотографируемых точек, то усложняется оборудование, но упрощаются методы математической обработки результатов измерений. Наоборот, при минимальных требованиях к ориентированию камеры, оборудова-

ние максимально упрощается, но усложняются методы математической обработки результатов измерений.

Немаловажными аспектами калибровки являются: точность используемого оборудования; методика и оценка точности выполненных измерений, и обработка их результатов.

При калибровке, как минимум, должны быть определены:

- эквивалентное калиброванное фокусное расстояние, соответствующее наилучшей фокусировке фотоаппарата, зафиксированной при его юстировке;

- главная точка снимка $x_0 y_0$ (точка нулевой дисторсии).

- средняя радиальная дисторсия Δr ,

Для юстировки и калибровки разработан способ, основанный на фотографировании системы геодезических опорных точек, пространственные координаты которых известны. Предложена технология, обладающая тем преимуществом, что фотосъемка опорных точек, выполняемая одной и той же камерой, осуществляется независимо с 4 точек пространства. Разработана компьютерная программа совместной математической обработки 4 снимков методом наименьших квадратов (МНК), которая позволяет получать метрически достоверные фотограмметрические параметры калибровки с возможностью их использования для высокоточных внешнетраекторных измерений параметров движения ОИ в аэробаллистических экспериментах в ОИК. В качестве инструмента для организации и осуществления процесса фотосъемки опорных точек был разработан специальный калибровочный стенд [2].

Расчет параметров фокусировки для фотограмметрической съемки с близкого расстояния

При аэробаллистических испытаниях моделей в ОИК фотосъемку производят с относительно малого (близкого) расстояния, поэтому необходимо установить оптическую сопряженность между объектом и его изображением. Для расчета глубины резкости изображения в определенном диапазоне расстояний до объекта, необходимо знать минимальное расстояние до объекта, при котором его изображение на снимке получится достаточно резким для измерительных целей. Это расстояние D до точки на оптической оси фотокамеры (сфо-

кусированной на «бесконечность»), начиная от которого и до бесконечности все предметы на изображении при заданном максимальном диаметре δ кружка нерезкости получают резкими, называется гиперфокальным.

Это расстояние определяется по формуле

$$D = \frac{f^2}{\delta} \frac{d}{f}, \quad (1)$$

где δ – допустимый диаметр кружка нерезкого изображения точки; f – фокусное расстояние объектива фотокамеры, сфокусированной на бесконечность; d/f – относительное отверстие объектива фотокамеры.

Формула (1) показывает, что при съемке с малых расстояний резкость изображения можно повысить диафрагмированием. Увеличение кружка нерезкости δ влияет на измерительную точность снимка. Однако если измерения на снимках производят по маркированным точкам, то величина нерезкости сказывается в меньшей степени, поскольку, хотя края марки и изображаются несколько нерезкими, визирование на центр при измерениях выполняется почти с одинаковой точностью.

Предельно допустимая величина нерезкости обусловлена разрешающей способностью объектива фотокамеры. Так, для объектива EF 50 mm 1,4 USM, которым оснащена фотокамера Canon EOS IDs, разрешающая способность объектива $\sim 20 \text{ мм}^{-1}$, что соответствует в линейной мере 0,05 мм. Опыт работ показывает, что при измерении по маркированным точкам нерезкость порядка 0,05 мм допустима, поэтому при расчетах принимаем 0,05 мм. Тогда гиперфокальное расстояние, рассчитанное по формуле (1) при относительном отверстии объектива $d/f = 1/8$, будет равно $D = 6,25 \text{ м}$, а глубина резкости будет простирается от $D = 6,25 \text{ м}$ до бесконечности. Глубину резкости изображаемого пространства ΔZ при съемке можно вычислить по значению гиперфокального расстояния

$$\Delta Z = 2Z_0^2 D / (D^2 - Z_0^2), \quad (2)$$

где Z_0 – отстояние до плоскости наводки на резкость; D – гиперфокальное расстояние, определяемое формулой (1) при заданном значении диаметра δ кружка нерезкости. Границы глубины резкости можно вычислить по формулам

$$Z_{\min} = Z_0(D + f) / (D + Z_0) \approx DZ_0 / (D + Z_0), \quad (3)$$

$$Z_{\max} = Z_0(D + f) / (D - Z_0) \approx DZ_0 / (D - Z_0). \quad (4)$$

Расчеты по формулам (1) – (4) для определения глубины и границ резкости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Допустимый кружок нерезкости δ , мм	$f_{\text{объектива}} = 50 \text{ мм}; d/f - 1 / 8$		
	Гиперфокальное расстояние D , м	Границы резкости, м	
0,05		передняя Z_{\min}	задняя Z_{\max}
	6,25	2,9	40,0

Следует иметь в виду, что в расчетах расстояние фокусировки $Z_0 = 5,5$ м выбрано исходя из высоты оси полета (оси стрельбы) ОИ в ОИК, совпадающей с центром зоны регистрации стереопоста ($Y \approx 2,33$ м). Фактически же наблюдаемая высота полета в среднем колеблется в пределах 1,5–1,9 м, за редким исключением. С учетом этого расчет фокусировки для нижней и верхней камеры наиболее целесообразно производить для расстояний $Z_0 = 5,3$ м и 5,7 м соответственно, либо повышать ось стрельбы до $Y \approx 2,33$ м для сохранения симметрии схемы регистрации и оптимизации подсветки модели.

Передняя граница резкости обеспечивает приемлемую глубину пространства для размещения опорных точек в зоне стереопоста в диапазоне отстояний по оси Z от 2,9 до 5,1 м, слева от оси полета ОИ, необходимых для повышения точности и надежности процесса юстировки стереопоста.

Фокусировка и фиксация объектива цифровой камеры

Известно, что объектив, имеющий хорошее качество изображения, может дать плохие результаты при съемке, если он недостаточно точно выставлен в камере. Положение объектива относительно плоскости снимка (в данном случае относительно плоскости светочувствительной матрицы камеры) для съемки на любую дистанцию должно быть строго определенное, поэтому возникает потребность в способе установки и проверки фокусировки объектива на заданную дистанцию. Как показали исследования, использование электронных средств автофокусировки камеры, способа ручной фокусировки через видоискатель, либо дистанционной шкалы на переходной оправе объектива, не обеспечивает наилучшей резкости изображения. Поэтому юстировка фотокамеры по выбору точного положения объектива осуществ-

лялась при помощи дополнительной дистанционной шкалы, временно устанавливаемой на оправу объектива. Шаг штрихов шкалы задавался минимально возможным [2].

Процесс фокусировки заключался в том, что на требуемой дистанции фокусировки $Z_0 = 5,4$ м выставлялась предметная шкала, либо штриховая мира и производилось ее фотографирование при пошаговом изменении положения объектива, задаваемого по штрихам дополнительной дистанционной шкалы. Каждый из полученных снимков оценивался в компьютере по резкости предметной шкалы и выбирался снимок с наилучшей резкостью. По штриху дистанционной шкалы, на котором был получен данный снимок, устанавливалось и фиксировалось положение объектива в фотокамере, которое указывало на соответствие заданной дистанции фокусировки при наилучшей резкости изображения.

Калибровочный стенд

Для экспериментальных исследований при отработке методики фотограмметрической калибровки цифровых камер создан рабочий макет калибровочного стенда. Основное назначение калибровочного стенда, кроме решения задач фокусировки осуществление жесткой фиксации объектива камеры в промежуточном положении. Этим самым достигается постоянство фокусного расстояния камеры, отъюстированной на заданное расстояние, а также обеспечивается необходимая для заданных условий съемки глубина резкости изображения, с гарантией неизменности (сохранности во времени) фотограмметрических параметров калибровки: фокусного расстояния камеры, координат главной точки и радиальной дисторсии объектива [2].

Технологическое оборудование стенда включает:

- систему из 70 опорных геодезических точек, равномерно расположенных в плоскости стенда по 4 взаимно пересекающимся направлениям (рис. 2);
- геодезическую систему опорных реперов и точек установки геодезических средств измерений для координирования опорных точек;
- специальную направляющую для установки и продольного смещения калибруемых камер при выборе требуемой дистанции фокусировки.

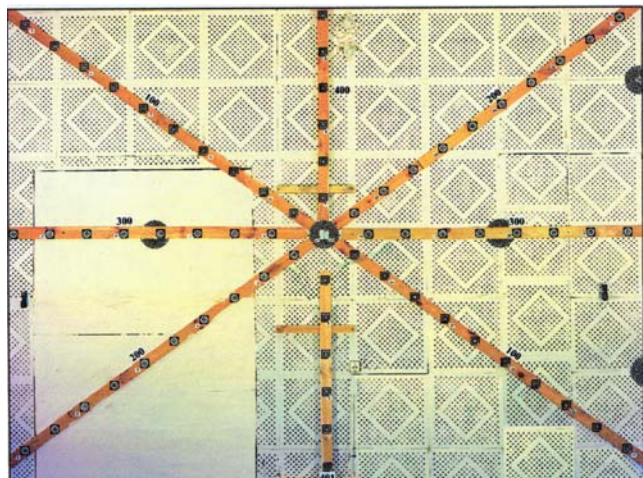


Рис. 2. Рабочий макет калибровочного стенда (изображение поля опорных геодезических точек)

Для однозначного решения задачи определения элементов как внутреннего ориентирования, так и внешнего ориентирования камеры в составе стенда предусмотрены также регулируемые подставки (штативы) для дополнительной установки 3–4 опорных точек на переднем плане.

Практически полноценный калибровочный стенд должен иметь систему из не менее 150 опорных точек для равномерного распределения по полю снимка и порядка 5–9 точек в ближнем плане.

Одной из наиболее сложных и важных задач при подготовке калибровочного стенда к проведению работ по метрологической аттестации камер, является обеспечение высокоточных ($\pm 0,1-0,3$ мм) пространственных геодезических измерений координат опорных точек, принимаемых за истинные при последующих вычислениях результатов фотограмметрической калибровки камер.



а



б

Рис. 3. Геодезические средства угломерно-дальномерных измерений: а – электронный тахеометр; б – уголкоый отражатель

Для этого используются прецизионные геодезические средства измерений – электронный тахеометр (рис. 3) и другие вспомогательные устройства, а

также соответствующая методика измерений, основанная на многократных (не < 3) приемах измерений, с осреднением и оценкой точности получения результатов.

Получение калибровочных снимков

Для получения калибровочных снимков используется пространственное поле опорных точек калибровочного стенда, располагаемых на конечном расстоянии от фотокамеры, которой производится их фотографирование. Исследуемая камера устанавливается последовательно в каждой из 4 точек фотографирования и ориентируется в центр калибровочного стенда так, чтобы в ее поле зрения попало максимально возможное количество опорных точек. Во всех случаях расстояние от фотокамеры до опорных точек должно быть не меньше расстояния до его переднего фронта резкости, чтобы четкость изображения точек в фокальной плоскости соответствовала разрешающей способности объектива камеры.

При выполнении калибровки все элементы оптической системы, зафиксированные при юстировке, и установочные параметры камеры (величина действующего отверстия) должны находиться в эксплуатационном положении, какое предполагается при производственном использовании камеры.

Экспериментально определяется оптимальная подсветка опорных точек и обеспечивается возможность получения требуемой выдержки.

Во время фотографирования фиксируются:

- обозначение каждого получаемого снимка;
- результаты геодезической привязки точек фотографирования (с точностью до $\pm 10-50$ мм);
- углы ориентации ν , φ , γ фотокамеры ($\pm 1^\circ-5^\circ$).

Фотограмметрическая обработка калибровочных снимков. Система координат цифрового фотоснимка

В цифровой фотограмметрии, базирующейся на цифровых изображениях, носителем информации является пиксел. Поэтому в отличие от аналогового фотоснимка, представляемого в непрерывном виде, цифровое изображение представляется в дискретном (цифровом) виде, а световые лучи, попадающие от объекта съемки через объек-

тив на фокальную плоскость цифровой камеры, регистрируются не на пленке, а с помощью датчиков камеры. Размеры пикселя зависят от разрешения цифровой камеры и определяют измерительные возможности цифрового снимка.

Цифровое изображение можно представить в виде двумерной матрицы G по размерам, заданным коэффициентом прямоугольности, с элементами $g(m, n)$, которые меняются одновременно с изменением координат изображения x, y . Число пикселей и соответствующее им число пар координат конечно, а не непрерывно, как на фотоснимке. Поэтому координаты в цифровом изображении могут быть только дискретными. Место каждого элемента в матрице G определяется по координатам изображения:

$$x = x_0 + m\Delta x, \quad y = y_0 + n\Delta y,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots, M$; $n = 0, 1, 2, \dots, N$; $\Delta x; \Delta y$ – интервалы между соседними точками изображения (размер пикселя), x_0, y_0 – начало отсчета координат.

На практике принимается $\Delta x = \Delta y$ и $N = M$. Для элементов $g(m, n)$, соответствующих одному пикселю матрицы G , применимы только дискретные величины.

Матрицу G , элементами которой являются значения $g(m, n)$, можно представить следующим образом:

$$|G| = \begin{matrix} g(0,0) & g(0,l) & g(0,N-l) \\ g(1,0) & g(1,l) & g(1,N-l) \\ \dots & \dots & \dots \\ g(M-1,0) & g(M-1,l) & g(M-1,N-l) \end{matrix}$$

Матрица G является точным цифровым изображением снимаемого объекта. Каждому ее элементу соответствует один пиксель. Величина $g(m, n)$, отнесенная к конкретному пикселю, обозначает его положение в матрице G , а сама матрица является носителем прямоугольной системы координат x, y цифрового снимка. Любая точка на цифровом снимке, в том числе и главная точка X_0, Y_0 , может быть определена в этой системе координатами любого пикселя. При задании системы координат можно использовать два способа. В первом способе начало отсчета координат измеряется на цифровом изображении в центральном пикселе. Тогда координаты главной точки, как точки симметрии для учета дисторсии, будут задаваться как смещения от центрального пикселя по осям x и y . Во втором способе в качестве точки начала отсчета координат измеряется левый нижний пиксель изображения, а координаты главной точки задаются как смещения от левого нижнего пикселя по осям x и y . Эти смещения рассчитываются по данным фотограмметрической калибровки камеры. С точки зрения пользователя удобнее всего работать в системе координат x, y , связанной с левым нижним пикселем изображения [2].

Измерение координат цифрового снимка

Полученные калибровочные снимки обрабатывались с помощью фотограмметрического программного обеспечения «Photomod ВТ ФГИ» [3] (рис. 4), предназначенного для съема координатной информации с цифровых изображений. Измерение координат снимков осуществлялось оператором путем отождествления и наведения

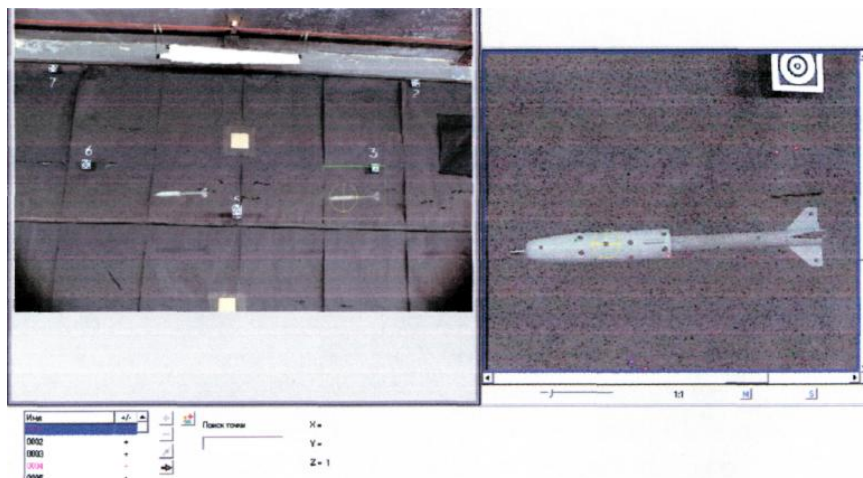


Рис. 4. Окно ПО Photomod ВТ ФГИ «Измерение точек»

измерительного маркера (курсора) последовательно на изображениях всех реперных точек. ПО «Photomod ВТ ФГИ» обеспечивает высокую (субпиксельную) точность измерения координат с погрешностью, меньшей, чем разрешение элемента изображения камеры (не хуже 2 мкм).

При измерениях использовался второй способ выбора начала отсчета координат в левом нижнем пикселе изображения. По каждой камере измерялось от 4 до 12 снимков (1–3 снимка с каждой точки фотографирования). На этих материалах осуществлялись отработка методики фотограмметрической калибровки и вычисление параметров внутреннего ориентирования камер.

Математическое описание задачи калибровки

Процесс калибровки предполагает, что получаемые калибровочные снимки строго соответствуют внутренним связкам лучей камеры.

Получаемая координатная информация – совокупность данных из измерений фотокоординат опорных точек на калибровочных снимках, опорная координатная информация геодезических измерений, предварительных калибровок камеры, обрабатывается по специальной программе. В результате обработки аналитически определяются параметры как внутреннего, так и внешнего ориентирования камеры.

Параметрами внутреннего ориентирования являются координаты центра проектирования в системе координат фотоснимка, т. е. положение главной точки, фокусное расстояние и коэффициенты дисторсии. А параметры внешнего ориентирования определяют связь системы координат фотоснимка и выбранной внешней системы координат.

В качестве внешней системы координат и параметров внешнего ориентирования камеры: координат центра проектирования (X_s, Y_s, Z_s); угла наклона ν , угла отклонения ψ и угла разворота γ системы координат цифрового снимка, выбрана условная геодезическая система координат калибровочного стенда с началом в правой точке базиса, с которого осуществляются геодезические измерения координат (X_i, Y_i, Z_i); поля опорных точек.

Условные уравнения, используемые при калибровке и связывающие между собой точные значения исходной координатной информации с определяемыми параметрами, имеют вид

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ f_k \end{vmatrix} = K \cdot \begin{vmatrix} X_\phi \\ Y_\phi \\ Z_\phi \end{vmatrix} \quad (5)$$

где x, y – неискаженные координаты изображений опорных точек на снимке; f_k – калиброванное фокусное расстояние камеры; K – коэффициент пропорциональности;

$$\begin{vmatrix} X_\phi \\ Y_\phi \\ Z_\phi \end{vmatrix} = A \cdot \begin{vmatrix} X_r - X_s \\ Y_r - Y_s \\ Z_r - Z_s \end{vmatrix} \quad (6)$$

X_ϕ, Y_ϕ, Z_ϕ – пространственные фотограмметрические координаты опорных точек в системе координат камеры; X_r, Y_r, Z_r – координаты опорных точек в условной системе геодезических измерений; X_s, Y_s, Z_s – координаты точки фотографирования; A – матрица направляющих косинусов, устанавливающая угловую связь между координатами X_ϕ, Y_ϕ, Z_ϕ и x, y .

Исключив из формулы (5) коэффициент пропорциональности K , получим уравнения

$$\begin{aligned} x &= f_k X_\phi / Z_\phi, \\ y &= f_k Y_\phi / Z_\phi, \end{aligned} \quad (7)$$

которые представляют собой используемые в фотограмметрии уравнения коллинеарности.

Поскольку измерения по снимку отнесены к началу координат, а не к главной точке, то

$$\begin{aligned} x' &= x - x_0, \\ y' &= y - y_0, \end{aligned} \quad (8)$$

где x', y' – координаты, отнесенные к главной точке, но не исправленные за дисторсию; x, y – измеренные и осредненные координаты в системе координат снимка; x_0, y_0 – неизвестные или приближенно известные координаты главной точки.

Радиальная дисторсия Δr может быть представлена относительно неизвестного значения фокусного расстояния, например, в виде

$$\Delta r = k_1 r^1 + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots, \quad (9)$$

где r – радиальное расстояние от точки изображения до главной точки. При этом

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2} = \sqrt{((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)}. \quad (10)$$

Поскольку $\Delta x' = (x'/r) \Delta r$ и $\Delta y' = (y'/r) \Delta r$, где $\Delta x'$ и $\Delta y'$ – поправки к x' и y' , то

$$\begin{aligned} x &= x' + \Delta x' = x' + \frac{x'}{r} \Delta r = x' \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right); \\ y &= y' + \Delta y' = y' + \frac{y'}{r} \Delta r = y' \left(1 + \frac{\Delta r}{r} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

После подстановки (8) и (9) в (11) получим

$$\begin{aligned} x &= (x - x_0)(1 + k_1 + k_2 r + k_3 r^2 + \dots); \\ y &= (y - y_0)(1 + k_1 + k_2 r + k_3 r^2 + \dots). \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнения (12) могут быть подставлены в (5), после чего получим

$$\begin{aligned} (x_i - x_0)(1 + k_1 + k_2 r + k_3 r^2 + \dots) + f_k X_\phi / Z_\phi; \\ (y_i - y_0)(1 + k_1 + k_2 r + k_3 r^2 + \dots) + f_k Y_\phi / Z_\phi. \end{aligned} \quad (13)$$

Эти уравнения могут быть записаны в форме условных уравнений для i -й опорной точки

$$v_{xi} = (x_i - x_0)(1 + k_1 + k_2 r + k_3 r^2 + \dots) + f_k X_\phi / Z_\phi = 0; \quad (14)$$

$$v_{yi} = (y_i - y_0)(1 + k_1 + k_2 r + k_3 r^2 + \dots) + f_k Y_\phi / Z_\phi = 0$$

и решены относительно фокусного расстояния f_k , координат главной точки x_0 , y_0 , коэффициентов дисторсии k_1 , k_2 , k_3 ... и параметров внешнего ориентирования X_s , Y_s , Z_s , v , ϕ , γ камеры.

Уравнения (14) должны быть линеаризованы, для чего положим

$$\begin{aligned} f_k &= f_k^0 + \delta f_k, k_1 = k_1^0 + \delta k_1, X_s = X_s^0 + \delta X_s, v = v^0 + \delta v; \\ x_0 &= x_0^0 + \delta x_0, k_2 = k_2^0 + \delta k_2, Y_s = Y_s^0 + \delta Y_s, \phi = \phi^0 + \delta \phi; \\ y_0 &= y_0^0 + \delta y_0, k_3 = k_3^0 + \delta k_3, Z_s = Z_s^0 + \delta Z_s, \gamma = \gamma^0 + \delta \gamma, \end{aligned} \quad (15)$$

а также

$$\begin{aligned} x_i &= x_i^0 + \vartheta x_i; \\ y_i &= y_i^0 + \vartheta y_i, \end{aligned}$$

где верхний значок «нуль» указывает на измеренные или приближенные значения величин; через δ обозначены поправки к приближенным значениям, а через ϑ – поправки к измеренным значениям координат изображений опорных точек.

После подстановки (14) в (13) и разложения в ряд Тейлора получают уравнения, которые для упрощения, ввиду громоздкости написания, приводятся в матричной форме. Эти уравнения для всех m опорных точек имеют вид

$$\vartheta + B\delta = \varepsilon,$$

где

$$\vartheta = \begin{vmatrix} \delta f_k \\ \delta x_0 \\ \cdot \\ \delta y_0 \end{vmatrix} B = \begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ B_m \end{vmatrix} \varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \varepsilon_m \end{vmatrix}.$$

Уравнения составляются для каждой опорной точки, координаты которой были измерены на фотоснимке. Эти уравнения решаются относительно дифференциальных поправок $(\delta f_k, \delta x_0, \dots, \delta y_0)$, которые придаются к приближенным значениям $(f_k^0, x_k^0, \dots, \gamma_k^0)$, в результате чего получается следующее приближение. Необходимо отметить, что начальное и каждое последующее приближенное значение коэффициентов K_1, K_2, K_3 удовлетворяет уравнениям, а окончательные значения коэффициентов эквивалентны последним дифференциальным поправкам к ним. Решение последовательными приближениями продолжается до тех пор, пока поправки δ (за исключением коэффициентов k) не станут достаточно малы или пока весовая сумма квадратов остаточных невязок s (16) не стабилизируется.

Поскольку всегда будут иметься избыточные данные, т. е. число уравнений будет больше числа неизвестных, применяется строгое решение по способу МНК под условием минимума суммы квадратов величин

$$s = \vartheta^T \sigma^{-1} \vartheta, \quad (16)$$

где σ – ковариационная матрица для m опорных точек.

Грубые ошибки в измерении координат изображений опорных точек являются обычным источником затруднений при уравнивании. Поэтому все измерения с большими остаточными невязками должны быть исключены, после чего уравнивание следует повторить.

Для того чтобы определить фокусное расстояние и функцию дисторсии для некоторого желательного распределения (например, чтобы абсолютные величины максимальной положительной и отрицательной поправок были равны), следует найти расстояние r , при котором поправки равны нулю. Наиболее просто это делается графически. Затем вычисляются

$$f_k = f_k \left(\frac{r'}{r' + \Delta r'} \right), \Delta f_k = \left(\frac{-\Delta r'}{r' + \Delta r'} \right) \approx f_k \left(\frac{-\Delta r'}{r} \right),$$

где $\Delta r'$ – ранее полученное значение дисторсии для расстояния r' .

Результаты фотограмметрической калибровки цифровых камер

По методике, описанной выше, выполнена фотограмметрическая калибровка и получены параметры внутреннего ориентирования (фокусное расстояние, координаты главной точки и дисторсия) цифровых неметрических камер:

– Canon EOS-IDs, разрешение 4063x2703 (11,4 Мп), фокусное расстояние 50 мм, формат кадра 23,8x35,8 мм;

– Kodak DCS Pro, разрешение 4500x3000 (13,5 Мп), фокусное расстояние 50 мм, формат кадра 23,7x35,5 мм.

Пример результата калибровки показан на рис. 5 в виде формы разработанного формуляра. Калибровка выполнялась только для промежуточного значения фокусного расстояния, соответствующего расстоянию до плоскости наводки на резкость $Z_0 = 5,4$ м.

Качество или точность определения параметров согласования при выполнении калибровки характеризуется окончательными величинами отклонений расчетных координат опорных точек от их измеренных значений (остаточными невязками), которые в целом не превышают случайных погрешностей измерения координат снимков. Дисторсия определялась по четырем осям (практически по всей площади кадра) и оказалась очень большой на периферии кадра. Так, например, для камеры Kodak DCS Pro №22399 – до 45 пикселей (354 мкм).

Проведенные оценки показали, что для полной калибровки камеры требуется три конвергентных снимка или более. Направления съемки для этих снимков ни в коем случае не должны лежать в одной плоскости. При трех съемках они должны образовывать, например, грани, лежащие на пересечениях возникающей равносторонней пирамиды.

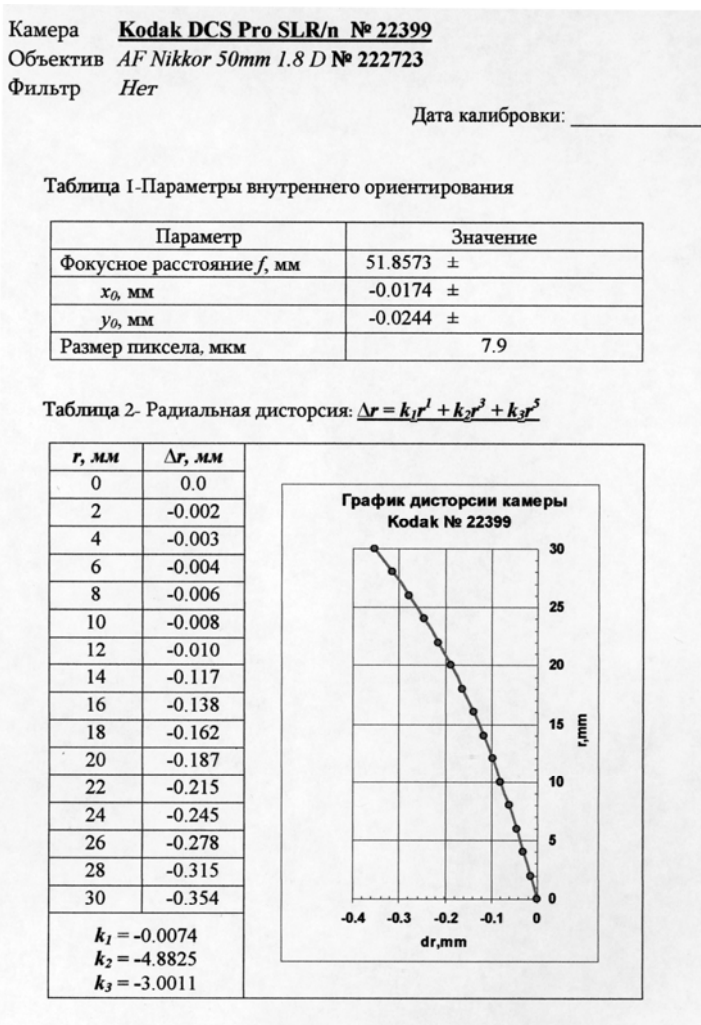


Рис. 5. Паспорт фотограмметрической калибровки цифровой камеры

Разработка элементов конструкции для монтажа и крепления камер

Одним из требований, предъявляемых к установке камеры в проектное (рабочее) положение – жесткость крепления, обеспечивающая неизменность пространственной ориентации камеры во времени. Используемые цифровые камеры, как правило, имеют пластмассовый корпус с отдельными элементами металлических (алюминиевых) вставок. Обеспечить жесткий захват такой камеры весьма проблематично. Для решения данной проблемы были разработаны и изготовлены конструктивные элементы специальной оснастки:

– платформы-ложементы (рис. 6), обеспечивающие жесткую фиксацию корпуса, освобождая тем самым его от возможных деформаций при установке камеры по месту использования;

– стальные боксы-сейфы для размещения камер (рис. 7), выполняющие одновременно роль защиты камеры от физического воздействия во время опыта, а также ее сохранения от несанкционированного доступа; в нижней части боксов сосредоточены адаптер питания и блок управления затвором камеры.

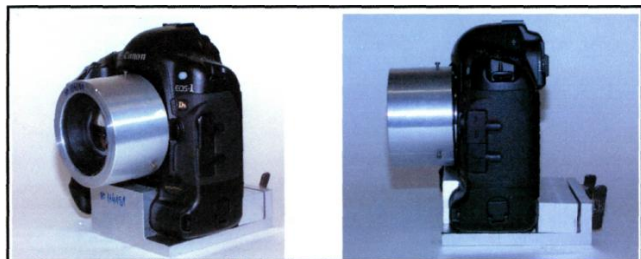


Рис. 6. Камера на платформе-ложементе

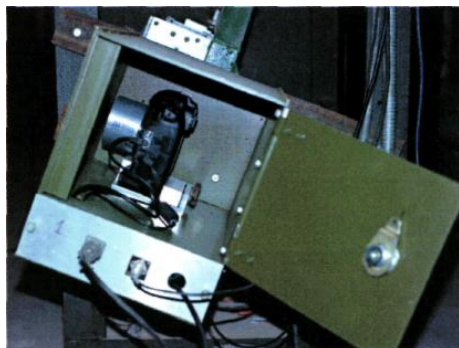


Рис. 7. Размещение камеры в боксе-сейфе

Монтаж оборудования стереопоста

Экспериментальный вариант стереопоста в составе 4 цифровых фотокамер был смонтирован

в зоне расположения штатного аналогового стереопоста (АС) без нарушения его дальнейшего функционирования. Боксы вместе с установленными в них камерами жестко крепились к металлоконструкции штатного АС-5 (см. рис. 8, выделены зеленым цветом) и ориентировались в пространстве измерительной трассы ОИК.



Рис. 8. Общий вид экспериментального ЦФСР

Две камеры Canon EOS-1Ds были смонтированы на вертикальном базисе фермы-стойки крепления штатных АФА, а две другие камеры – Kodak Pro SLR/n – на горизонтальном базисе швеллера помоста для обслуживания камер АФА. В этом смысле, стабильность положения камер, располагаемых на горизонтальном базисе, недостаточно надежно. В центре стереопоста установлен бокс технологического пульта управления, аналогичный боксу-сейфу для размещения камер. В нем размещены кабели питания и управления камерами, а также концентратор Kramer VS-8FW, обеспечивающий доступ ко всем 4-м камерам при выполнении настроек и скачивании опытной фотографии в портативный компьютер.

Юстировка стереопоста

По завершении монтажа ЦФСР, подключения линий электропитания и управления цифровых камер, были проведены соответствующие пусконаладочные работы и выполнена юстировка по определению параметров внешнего ориентирования камер с целью «встраивания» стереопоста в систему координат измерительной трассы ОИК. Для юстировки в зоне АС была организована сеть настенных и выносимых на передний план опорных геодезических точек, с обеспечением высокоточной привязки ($\pm 0,3-0,5$ мм) в системе координат измерительной трассы ОИК. В отличие от штатной методики юстировки, основанной на створно-нивелирных измерениях, здесь была при-

менена методика с использованием электронного тахеометра.

Большие затруднения в постановке и проведении котиловочных работ были связаны с организацией создания опорных точек (контрольных марок), которая была далека от совершенства по причине временного обустройства цифрового стереопоста, отсутствия необходимого конструктивного оформления контрольных марок. Использовались импровизированные контрольные марки, изготовленные из подручных материалов. Вторая проблема заключалась в создании дополнительной створной линии для организации точек базиса съемки для установки и центрирования электронного тахеометра в ограниченном пространстве коридора створной линии.

В перспективе качество юстировки стереопостов ОИК может быть существенно улучшено и усовершенствовано путем внедрения и использования современных лазерных технологий (на базе лазерного трекера). Это позволит значительно сократить время, требуемое для выполнения юстировки. Результаты юстировки могут быть получены в течение рабочего дня и, появляется возможность выполнения юстировки непосредственно перед проведением аэробаллистических испытаний.

Результаты экспериментальных исследований ЦФСП

Результаты исследований по разработке и созданию стереопоста: принципиальные положения схемы регистрации, технология, методика калибровки камер и выполнения внешнетраекторных фотограмметрических измерений были проверены и использованы в производственных условиях применения.

В качестве примера на рис. 9 приведены фрагменты цифровой съемки, выполненной в одном из опытов.

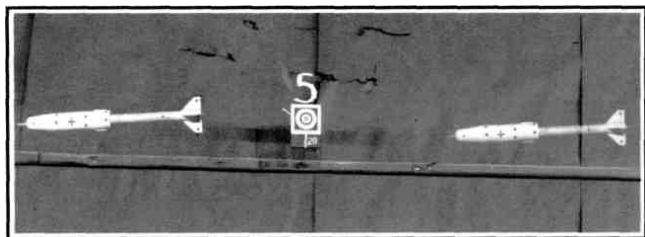


Рис. 9. Фрагмент цифровой фотосъемки в опыте

Для оценки точностных характеристик использования ЦФСП при решении задач ВТ ФГИ в производственных условиях применения проведен анализ опытной информации, который заключался в фотограмметрической и математической обработке цифровых снимков стереопоста, полученных в нескольких опытах. Методика обработки была одинакова для всех опытов. Координатная (фотограмметрическая) обработка снимков проводилась с использованием программного обеспечения Photomod ВТ ФГИ (см. рис. 4). Для каждого снимка измерялись фотокоординаты опорных точек геодезического обоснования и координаты реперных марок на боковой поверхности испытуваемой аэродинамической модели. С помощью программного обеспечения «АСНИ Филин» (разработка ВНИИЭФ) проводилось уточнение параметров внешнего ориентирования камер в опыте. При обработке использовались параметры фотограмметрической калибровки (фокусное расстояние, координаты главной точки и коэффициенты радиальной дисторсии), полученные на этапе аттестации камер в условиях калибровочного стенда. Используя полученные данные, вычислялись внешнетраекторные параметры движения: пространственные линейные (X, Y, Z) и угловые (ν, φ, γ) координаты модели в опыте.

В табл. 2 приведены экспериментальные оценки результатов ВТ ФГИ параметров движения модели, полученных в опытах цифровым стереопостом и, для сравнения, – результаты измерений штатным пятым постом аэробаллистического тира АС-5.

Как видно из анализа таблицы, полученные в опытах точности ВТ ФГИ характеризуются среднеквадратическими погрешностями, равными 0,1–0,4 мм по линейным координатам и 0,1°–0,7° по угловым координатам.

По отношению к измерениям, выполненным традиционными средствами штатного фотопоста АС-5, наблюдается практически полное совпадение результатов при значительно меньших, в 1,5–2,0 раза, погрешностях. Это свидетельствует о том, что методика ВТ ФГИ, основанная на использовании цифровых фотокамер, наиболее эффективна, но требует предварительной юстировки и прецизионной фотограмметрической калибровки камер, входящих в состав цифрового стереопоста.

Внешнетраекторные фотограмметрических измерения параметров движения ОИ в трех опытах

Средства регистрации	Положение ОИ	X	Y	Z	v	φ	γ
		м			град		
Опыт 1							
АП-5	2	38,504	1,502	0,102	-3,6	1,7	209,4
ЦФСР	2	38,502	1,501	0,102	-3,6	2Д	211,5
АП-5	3	40,008	1,467	0,104	-3,6	2,1	209,3
ЦФСР	3	40,010	1,467	0,102	-3,5	1,8	207,9
Опыт 2							
АП-5	2	38,807	1,904	0,053	-3,9	-2,0	341,3
ЦФСР	2	38,806	1,905	0,053	-3,9	-1,9	342,1
АП-5	3	40,316	1,893	0,056	-4,5	-1,8	341,5
ЦФСР	3	40,315	1,893	0,055	-4,5	-1,7	342,1
Опыт 3							
АП-5	2	38,350	2,151	-0,032	2,0	1,6	513,3
ЦФСР	2	38,349	2,152	-0,032	1,9	1,7	512,5
АП-5	3	39,851	2,146	-0,032	1,2	1,4	520,5
ЦФСР	3	39,849	2,148	-0,032	1,3	1,5	519,9
Опыт 4							
АП-5	2	38,358	2,161	0,383	-3,6	-3,1	265,4
ЦФСР	2	38,356	2,161	0,382	-3,6	-3,0	265,0
АП-5	3	39,862	2,151	0,395	-3,6	-2,7	276,4
ЦФСР	3	39,859	2,151	0,394	-3,7	-2,5	277,5

Список литературы

1. Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.

2. Герасимов С. И., Калмыков П. Н., Костин В. И. Получение внешнетраекторных данных в аэробаллистическом эксперименте: Сборник статей XX Юбилейной Всероссийской научно-

технической школы-семинара «Обработка, передача и отображение информации о быстропротекающих процессах». М.: РПА «АТР», 2009.

3. Система «Photomod ВТ ФГИ». Программа «Photomod АТ». Руководство пользователя. М.: Ракурс, 2006.

Статья поступила в редакцию 07.06.2012.