

УДК 528.711+65.011

В. В. ВАЙНАУСКАС, А. А. ПИЛИПАЙТИС, Д. В. МАРДОСЕНЕ

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

В последнее время при развитии методов и технологий близкосъемочной фотограмметрии большое внимание уделяется широкому использованию ЭВМ как для обработки измерительной информации, так и для анализа полученных результатов с целью извлечения необходимых количественных и качественных показателей. Во многих областях применения фотограмметрических методов часто достаточным является высокоточное определение пространственных координат множества дискретных точек, т. е. построение цифровой модели исследуемого объекта.

В близкосъемочной фотограмметрии приходится применять до нескольких сотен точек в одной стереопаре вместо 6—12, используемых при построении фотограмметрических сетей. Обычно здесь абсолютная точность имеет второстепенное значение, необходима лишь высокая взаимная точность искомых точек. Следовательно, надежное определение масштаба модели имеет решающее значение. Нередко применяется случай конвергентной съемки, чтобы с наибольшей точностью найти превышения точек объекта.

В целях автоматизации процессов обработки снимков наряду с привлечением аналитических методов также исключительно большое значение имеет и графообразное представление результатов исследования, т. е. составление карт, планов, чертежей, сечений и различных гистограмм. Имеется ряд и обусловленных факторов, стимулирующих развитие и адаптацию аналитических методов в близкосъемочной фотограмметрии, к которым следует отнести использование неметрических камер, при помощи которых полученные снимки не всегда можно обработать на аналоговых приборах. Поэтому дальнейшее совершенствование цифровых методов обработки снимков имеет большое практическое и научное значение, особенно это касается автоматизации составления графических материалов.

Производственные опыты убедительно показали, что для обработки фотограмметрической измерительной информации нужно располагать пакетом соответствующих программ, чтобы успешно решать возникающие различные задачи с учетом условий оптимизации и обеспечения необходимой точности окончательных результатов. В лаборатории инженерной фотограмметрии Вильнюсского университета создан пакет программ, базирующихся на класси-

ческих формулировках основных фотограмметрических функциональных зависимостей коллинеарности и компланарности.

**Построение коллинеарной модели объекта.** При использовании уравнений коллинеарности математическую модель всех проектирующих лучей можно представить уравнением общего вида

$$V = \dot{B}\delta + \ddot{B}\ddot{\delta} + \ddot{B}\ddot{\delta} + L, \quad (1)$$

где  $V$  — матрица остаточных ошибок (невязок) в координатах точек снимков;  $\delta$  — поправки параметров внешнего ориентирования снимков;  $\ddot{\delta}$  — поправки координат точек объекта;  $\ddot{\delta}$  — поправки параметров внутреннего ориентирования снимков;  $\dot{B}$ ,  $\ddot{B}$  и  $\ddot{B}$  — матрицы частных производных основных функций коллинеарности по соответствующим переменным;  $L$  — матрица свободных членов. Уравнения наблюдений составляют на основании следующих измерений: 1) по фотограмметрическим измерениям координат точек снимков; 2) по определениям элементов внешнего ориентирования камеры; 3) по геодезическим измерениям координат опорных точек объекта; 4) по геодезическим измерениям расстояний, превышений точек объекта относительно центров фотографирования, центральных углов и азимутов центральных направлений; 5) по геодезическим измерениям расстояний, превышений, углов и азимутов между точками и направлениями в пространстве объекта; 6) по измерениям длины базиса фотографирования и превышения его концов. Следовательно, математическое решение задачи включает уравнения следующих типов [1, 2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} V &= \dot{B}\delta + \ddot{B}\ddot{\delta} + \ddot{B}\ddot{\delta} + L, && \text{координаты точек снимков} \\ \dot{V} &= \dot{\delta} && + \dot{L}, && \text{параметры внешнего} \\ &&& && \text{ориентирования снимков} \\ \ddot{V} &= \ddot{\delta} && + \ddot{L}, && \text{координаты опорных точек} \\ V_c &= \dot{B}_c\delta + \ddot{B}_c\ddot{\delta} + && L_c, && \text{измерения в станции} \\ V_o &= \ddot{B}_o\ddot{\delta} + && L_o, && \text{измерения в объекте} \\ V_B &= \dot{B}_B\delta + && L_B, && \text{измерения базиса} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При условии, что  $\delta = [\delta, \ddot{\delta}, \ddot{\delta}]^T$ , все уравнения (2) можно записать в общем виде

$$V = B\delta + L. \quad (3)$$

Тогда

$$(B^T P B)\delta + B^T P L = 0, \quad (4)$$

где  $P$  — весовая матрица. В вычислительных процедурах сначала определяют  $\delta$  и  $\ddot{\delta}$ , а потом включают  $\ddot{\delta}$ , причем задачу решают итеративным методом, пока поправки становятся пренебрегаемо малыми. Такая формулировка фотограмметрической задачи на практике предоставляет большую гибкость и свободу в подборе

наиболее подходящей опоры для определения масштаба и ориентировки модели объекта при правильном учете весов фотограмметрических и геодезических измерений.

**Построение компланарной модели объекта.** В этом случае решение задачи делится на две фазы: 1) взаимное ориентирование снимков; 2) объединение моделей дуплетов и абсолютное ориентирование мультиплетов в систему координат объекта. Под условием компланарности проектирующих лучей решается задача взаимного ориентирования снимков согласно векторному уравнению

$$(R_1 \times R_2) \cdot R_0, \quad (5)$$

где  $R_0$  — вектор, соединяющий два центра фотографирования. Полную систему уравнений можно представить в виде

$$AV = B\delta + L, \quad (6)$$

где  $V$  — матрица остаточных ошибок (невязок) в координатах снимков;  $\delta$  — матрица неизвестных параметров взаимного ориентирования снимков;  $A$  и  $B$  — матрицы коэффициентов (частных производных);  $L$  — матрица свободных членов. После определения элементов взаимного ориентирования снимков по задаче прямой засечки вычисляются пространственные координаты точек объекта. Абсолютное ориентирование модели производят по формулам пространственного линейного конформного или аффинного трансформирования [3, 4]. Данный способ удобен при обработке отдельных стереопар, так как в этом случае задачу можно решить при помощи настольных ЭВМ. В случае обработки нескольких стереопар (мультиплета) отдельные модели объединяют в общую систему координат и лишь потом выполняют окончательное уравнение.

Возможны и другие математические формулировки построения цифровых моделей объектов по снимкам, например, при обработке неметрических снимков допускается использование более общих условий построения проектированных моделей, т. е. применить теорию проективной геометрии.

**Дигитализация и анализ данных.** Сбор дискретных числовых данных об объектах выполняют тремя способами: 1) дигитализацией существующих карт, планов и чертежей; 2) измерением координат снимков (т. е. полностью аналитический способ); 3) дигитализацией пространственных координат точек модели, построенной на аналоговых стереоприборах (т. е. полуаналитический способ). Основное внимание уделим второму способу, как наиболее универсальному и точному, при котором можно обработать любые снимки.

В зависимости от метода и процедур, используемых в процессах фотограмметрии и дигитализации, цифровые данные, представляющие поверхность объекта, подбирают в виде прямоугольных сеток, параллельных профилей — сечений или произвольно размещенных характерных точек. Так как в процессах фотограмметрии и дигитализации всегда необходимо минимизировать число

дискретных точек, то обычно измеряют характерные точки, представляющие ситуацию и рельеф исследуемого объекта. Поэтому в программах используют методы прямолинейного и криволинейного интерполирования. Подбор математической модели и процедур зависит от точностных требований, густоты и размещения исходных данных, а также и от априорного представления о форме исследуемого объекта. Кроме того, тип параметров и алгоритм зависят от структуры цифровых данных и требований потребителя.

На основании цифровых моделей объектов легко можно получить следующие качественные и количественные параметры (показатели): 1) геометрические параметры — площадь, объем, периметр, кривизна, радиус, градиент; 2) параметры движения и изменения — скорость, ускорение, площадь, объем и след; 3) статистические параметры — распределение ареалов (площадей), объемов, масс, вариация выборок и времени; 4) физические параметры — центр тяжести, давление, деформация и сила; 5) форму моделирующей поверхности объекта и т. д.

Графическое представление используют для целей иллюстрации и визуального показа результатов. Во многих случаях практики оно является окончательной продукцией исследований (топографический план участка местности, архитектурный чертеж объекта и т. д.). Последние вычерчивают при помощи программно-управляемого графопостроителя или автоматического координатографа от магнитной или перфоленты off—line или представляют на экране графического дисплея. Среди наиболее распространенных графических материалов используют топографические карты, планы ситуации и рельефа, тематические и перспективные чертежи, профили, сечения и различные гистограммы.

На рис. 1 представлена схема автоматизированной фотограмметрической системы картографирования (АФСК). Основная материально-техническая база (фотограмметрические приборы) и математическое обеспечение для ЭВМ позволяют реально решать проблему автоматизации многих задач фотограмметрии. Для этого необходимо правильное соединение различных функциональных программ в одну систему, которая должна быть гибкой в отношении подключения специальных программ.

**Автоматизация составления графических материалов.** В лаборатории инженерной фотограмметрии Вильнюсского университета с 1980 г. начата разработка автоматизированной фотограмметрической системы для картографирования небольших объектов: архитектурных памятников, географических ландшафтов и геологических образований (архитектурных ансамблей, их достопримечательных мест, абразионных берегов рек, озер, водохранилищ, морей, мигрирующих дюн на косе Куршской Неринги и др.).

Технической базой АФСК являются различные наземные и воздушные фотокамеры, стереокомпараторы «стекло 1818» или «стеклометр», ЭВМ СМ-3, СМ-4, ЭВМ ЕС-1033 или ЕС-1060, автоматический координатограф «Дигиграф 1612», комплекс графических дисплеев и дигитайзер «ЭМ-709».

Для составления картографических материалов — структурных чертежей объектов проводятся фотосъемочные работы, дешифрирование (интерпретация) и координирование (привязка) снимков, измерение координат и параллаксов всех характерных точек объекта на стереокомпараторе с подготовкой абриса (иногда на увеличенных отпечатках снимков). Для получения цифровой модели объекта измерительная информация обрабатывается на мини-ЭВМ СМ-3 или СМ-4, так как они находятся в распоряжении лабора-

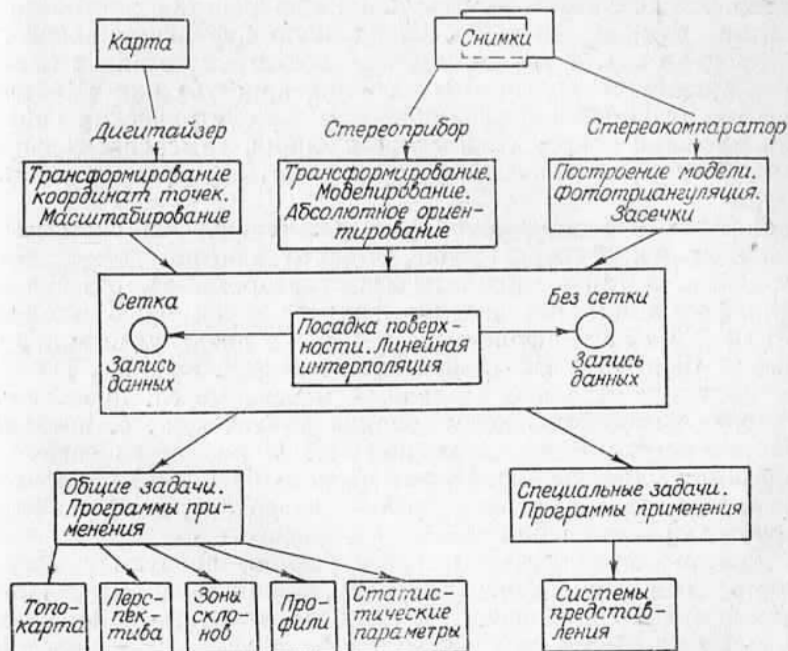


Рис. 1. Схема автоматизированной фотограмметрической системы картографирования.

тории и для них создан пакет необходимых программ. Результаты вычисления выводятся на печать и перфоленту, чтобы потом их можно было передавать на ЭВМ ЕС. Такой вынужденный вариант используют до приобретения к мини-ЭВМ графопостроителя и графического дисплея СМ-7300. После передачи данных с мини-ЭВМ на ЭВМ ЕС под управлением специальной информации производится картографическое изображение на автоматическом координатографе. Черчение обычно выполняется лишь после корректуры, редактирования и исправления чертежа при помощи графического дисплея ЕС-7905. Окончательная корректура, дополнение и доработка составительского оригинала выполняются вручную. Для нанесения второстепенных деталей используются приблизительно трансформированные снимки, по которым они рисуются вручную. То же самое относится к рельефу местности. При составлении плана местности пикетные точки рельефа наносятся машин-

ным образом, а рисовка горизонталей выполняется обычным методом при доработке и корректуре чертежа. Следует отметить, что для этого требуется мало времени, а задача всегда решается надежно и точно. В рассматриваемой системе особенно большое значение имеет возможность автоматической регистрации первичной исходной измерительной информации, т. е. применение автоматизированных стереокомпараторов.

Для построения цифровых моделей объектов архитектурного наследия, ландшафтного образования или участка местности при обработке снимков используются различные функциональные модели (программы). В случае наличия достаточного числа опорных точек применяются программы «Коллинеарность» или «Коллинеация», позволяющие строгую обработку и неметрических снимков. Если в качестве опоры используются линии, измеренные в пространстве объекта, то целесообразно применять программы «Компланарность».

**Работа автоматизированной фотограмметрической системы картографирования.** Каждой точке объекта соответствуют четыре числа: номер и три координаты (шестиразрядные). Массив цифровой информации этих чисел выводится с помощью мини-ЭВМ СМ-3 или СМ-4 на перфоленду, с которой в последующем эти данные вводятся в ЭВМ ЕС-1060 и записываются на диск. На диске также хранится отдельно введенный массив чисел, представляющих собой логическую схему соединения точек, т. е. последовательность номеров точек, заканчивающаяся кодом их соединения (информация управления автоматического черчения). Эта информация управления вводится в ЭВМ с перфокарт, которую составляет фотограмметрист на основании абрисов.

В программе, выполняющей построения, предусмотрена возможность соединения точек прямыми, сплайнами, окружностями и арками, можно зарисовать утолщенные, точечные и пунктирные прямые линии. Далее под управлением специальной программы DVARF и АК Дигиграфа 1612 вычерчивается чертеж в заданном масштабе согласно предписанной схеме соединения соответствующих точек объекта. Корректировка данных производится с помощью системы Примус через графический дисплей ЕС-7905. В данной системе используется АК Дигиграф 1612 с комплексом графических программ, составленных на языке Фортран «Графор».

Как видим, рассматриваемая автоматизированная фотограмметрическая система составления картографических материалов для различных исследуемых объектов имеет минимальное количество признаков кодирования, что очень облегчает работу подготовки измерительной и управляемой информации для ЭВМ. Для наглядности приводим примеры топографического плана (рис. 2) и архитектурного чертежа (рис. 3), составленные для использования предлагаемой АФСК.

**Точностная эффективность.** Выполненные исследования показали, что при обеспечении точности планового положения маркированных точек или линий в 5...10 мм и 5...10 см фотосъемку нужно выполнять в масштабах 1:250...1:500 и 1:2500...

1 : 5000 соответственно. При этом установлено, что эмпирическая точность по контурным точкам объекта практически получается примерно в два раза ниже. Следует заметить, что требуемая точность графических архитектурных чертежей согласно решениям Международного комитета архитектурной фотограмметрии должна составлять 1...2 см для масштаба 1 : 50, 2...5 см — для масштаба 1 : 100 и 0,5...1 см — для масштабов, применяемых в целях воспроизведения архитектурных деталей. В случае детального ис-

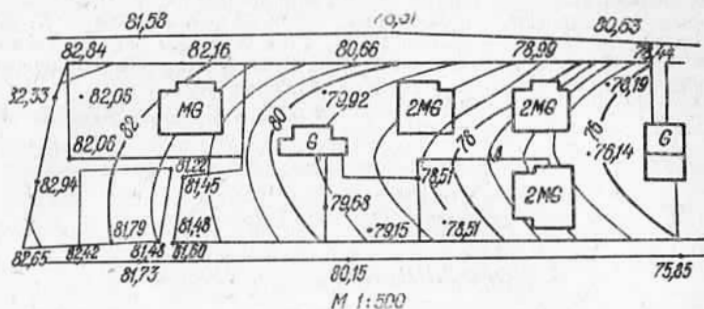


Рис. 2. Фрагмент топографического плана, масштаб 1 : 500, фокусное расстояние камеры 70 мм.

следования географических и геологических объектов достаточны масштабы 1 : 500...1 : 1000. Таким образом, АФСК легко обеспечивает графическую точность 0,2...0,5 мм картографических материалов при больших значениях коэффициента увеличения (чертеж-снимок), которые практически могут колебаться от  $\times 5$  до  $\times 10$ . Конкретные их значения выбирают в зависимости от качества фотосъемочного материала и точностных требований решаемых задач.

Основные преимущества автоматизированной фотограмметрической системы картографирования заключаются в универсальности, надежности, точности и гибкости, так как она позволяет обрабатывать снимки при любых элементах внешнего и внутреннего ориентирования, включая и неметрические. В связи с этим появляется возможность широкого использования любительских фотокамер при фотографировании объектов как с подвижных, так и стационарных станций. При этом положительную роль должна сыграть крупномасштабная воз-

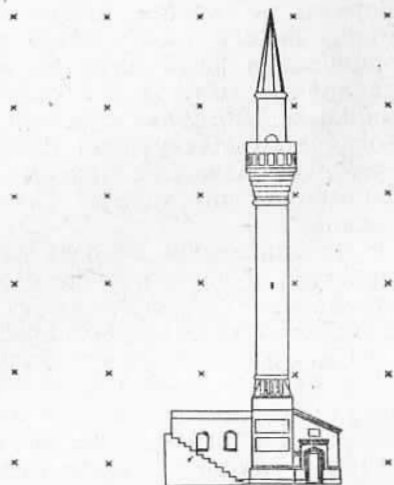


Рис. 3. Архитектурный чертеж фасада минарета г. Кедайняй, масштаб 1 : 50.

душная съемка с баллонных подъемных средств небольших объектов, где обычная аэрофотосъемка нерентабельна.

Хорошо себя оправдал и упрощенный вариант АФСК, когда по полученным пространственным координатам точек на мини-ЭВМ СМ-3 или СМ-4 при помощи прецизионного координатографа сравнительно быстро составляются необходимые графические чертежи.

**Список литературы:** 1. *Лобанов А. Н., Журкин И. Г.* Автоматизация фотограмметрических процессов. — М.: Недра, 1980. 2. *Ghosh Sanjib K.* Analytical Photogrammetry. — N. Y.: Pergamon Press, 1979. 3. *Rüger W., Pietschner J., Regensburger K.* Photogrammetrie. — Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1978. 4. *Vainauskas V.* Fotogrametrija. — Vilnius: Mokslas, 1977.

Статья поступила в редколлегию 16.04.81