

УДК 528.73:681.14.523(021)

В. В. ВАЙНАУСКАС

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ
МАРШРУТНАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

Известные методы построения независимых и полузависимых моделей являются приближенными, так как при определении координат точек не используются полностью избыточные внутренние связи и измерения. Абсолютное (внешнее) уравнивание сетей путем применения полиномиального интерполирования остаточных невязок на опорных геодезических точках также приближенное, поскольку оно не имеет строгого математического обоснования и эмпирически унаследовано из метода аналогового фототриангулирования. Предположение стохастической равнозначности и независимости координат точек сети при использовании различных полиномов противоречит основным требованиям метода наименьших квадратов. На практике полиномиальное уравнивание маршрутных фототриангуляционных сетей оправдало себя благодаря удобствам реализации на ЭВМ. Недостатком является отсутствие необходимых данных для эмпирической оценки окончательных результатов. В этом случае для достоверной оценки результатов уравнивания нужно использовать дополнительные контрольные геодезические точки.

Применение строгого метода связей требует более мощных ЭВМ для совместного решения большого числа уравнений. Данный метод не обладает приемами для эффективного выявления и устранения грубых ошибок измерения, вследствие чего значительно увеличивается число итераций, искажается геометрия сетей, что приводит к повторным переуравниваниям, требующим много средств и времени. Поэтому на основании изучения недостатков и преимуществ этих основных методов фототриангулирования при учете характерных свойств функциональных зависимостей компланарности и коллинеарности нами разработан новый метод пространственной аналитической маршрутной фототриангуляции.

Сначала при использовании функционального условия компланарности строятся независимые модели для всех последовательно идущих стереопар. Основные формулы вычисления пространственных координат точек в алгоритме имеют следующий вид:

$$\hat{X}'_i = X'_0 + \lambda'_i (X'_i - X'_0), \quad \hat{X}''_i = X''_0 + \lambda''_i (X''_i - X''_0),$$

$$\begin{aligned}\hat{Y}'_i &= Y'_0 + \lambda'_i (Y'_i - Y'_0), & \hat{Y}''_i &= Y''_0 + \lambda''_i (Y''_i - Y''_0), \\ \hat{Z}'_i &= Z'_0 + \lambda'_i (Z'_i - Z'_0), & \hat{Z}''_i &= Z''_0 + \lambda''_i (Z''_i - Z''_0), \\ X_i &= \hat{X}'_i = \hat{X}''_i, & Y_i &= (\hat{Y}'_i + \hat{Y}''_i)/2, & Z_i &= \hat{Z}'_i = \hat{Z}''_i,\end{aligned}\quad (1)$$

где λ'_i, λ''_i — масштабные коэффициенты.

Полученные независимые модели объединяются в общую систему координат маршрута путем пространственного линейного конформного трансформирования:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} -X & 0 & -Z & Y \\ -Y & Z & 0 & -X \\ -Z & -Y & X & 0 \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} m \\ d\Omega \\ d\Phi \\ dK \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

где U, V, W и X, Y, Z — пространственные координаты точек в системе маршрута и отдельной модели стереопары или в геодезической и фотограмметрической системах координат соответственно; U_0, V_0, W_0 — три параметра смещения координатных систем; Ω, Φ, K — угловые вращения координатных систем; m — масштабный коэффициент. Уравнения взаимного ориентирования снимков и подобного преобразования моделей решаются по методу наименьших квадратов. В этом ступенчатом процессе по остаточным невязкам в поперечных параллаксах и координатах общих точек бракуются недоброкачественные измерения и оценивается точность промежуточных предварительных построений. После отбраковки грубых измерений, согласно критерию Греббса для первичного внутреннего уравнивания, применяется принцип среднего арифметического, т. е. после объединения моделей координаты общих связующих точек усредняются. Преимущество процесса состоит в том, что в этом случае не требуется никаких геодезических данных и системы решаемых уравнений не превышают седьмого порядка, что легко реализуется на мини-ЭВМ. Заметим, что в качестве исходного модуля можно использовать алгоритм и программу, приведенные в [1], где порядок решаемых нормальных уравнений подобного преобразования доведен до третьего порядка.

Для абсолютного (внешнего) уравнивания фототриангуляционной сети по опорным геодезическим данным предварительно выполняется пространственное подобное преобразование в геодезическую систему координат, при котором выявляются и отбраковываются грубые измерения (геодезические точки). Окончательное внутреннее и внешнее уравнивание фототриангуляционной сети с учетом условия коллинеарности выполняется путем последовательного чередования решения обратных и прямых пространственных фотограмметрических засечек в итерационном процессе вычисления.

В случае применения для уравнивания пространственной фототриангуляционной сети функциональных зависимостей проективной коллинеарности проектирующих лучей рабочие формулы обратной и прямой фотограмметрических пространственных засечек в алгоритме имеют следующий вид [2]:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{ik} = N_{ik}^{-1} \begin{bmatrix} U & V & W & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -xU & -xV & -xW \\ 0 & 0 & 0 & 0 & U & V & W & 1 & -yU & -yV & -yW \end{bmatrix}_{ik} B_k + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix}_{ik},$$

$$B_k = [db_{11}^k \ db_{12}^k \ db_{13}^k \ db_{14}^k \ db_{21}^k \ db_{22}^k \ db_{23}^k \ db_{24}^k \ db_{31}^k \ db_{32}^k \ db_{33}^k]^\tau, \\ N_{ik} = b_{31}^k U_i + b_{32}^k V_i + b_{33}^k W_i + 1; \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{ik} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}_{ik} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix}_{ik}, \\ a_{11}^k = x_i^k b_{31}^k - b_{11}^k, \quad a_{12}^k = x_i^k b_{32}^k - b_{12}^k, \quad a_{13}^k = x_i^k b_{33}^k - b_{13}^k, \\ a_{21}^k = y_i^k b_{31}^k - b_{21}^k, \quad a_{22}^k = y_i^k b_{32}^k - b_{22}^k, \quad a_{23}^k = y_i^k b_{33}^k - b_{23}^k, \quad (4)$$

где U_i, V_i, W_i — геодезические координаты определяемых точек; x_i^k, y_i^k — измеренные координаты точек в k -м снимке; b_{ij}^k — коэффициенты проективного трансформирования k -го снимка; l_x, l_y — свободные члены.

При вычислении сначала последовательно для всех снимков, используя все точки, решаются обратные пространственные фотограмметрические засечки и определяются значения коэффициентов проективного трансформирования. Затем с помощью всех проектирующих лучей из смежных снимков для каждой точки составляются уравнения прямых засечек, которые решаются по методу наименьших квадратов и вычисляются пространственные координаты точек фототриангуляционной сети. Итерации продолжаются до тех пор, пока изменения параметров не стабилизируются. Оценка внутренней точности построения фототриангуляционных сетей выполняется по ковариационным матрицам отдельно для параметров трансформирования и координат точек сети.

В случае применения для уравнивания сети функциональных зависимостей классической перспективной коллинеарности проектирующих лучей рабочие формулы обратной и прямой фотограмметрических засечек в алгоритме имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{ik} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} \end{bmatrix}_{ik} D_k + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix}_{ik}, \\ D_k = [dU_0^k \ dV_0^k \ dW_0^k \ d\omega^k \ d\varphi_{\omega}^k \ d\alpha^k \ dx_0^k \ dy_0^k \ dz_0^k]^\tau; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{ik} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix}_{ik} \begin{bmatrix} dU \\ dV \\ dW \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix}_{ik}, \quad (6)$$

где U_0, V_0, W_0 — пространственные координаты центров фотографирования; ω, φ, κ — угловые элементы внешнего ориентирования снимков; a_{ij} — частные производные; l_x, l_y — свободные члены.

Следует заметить, что в этом случае вместо (6) можно успешно использовать уравнения прямых пространственных засечек (1), которые решаются во всех возможных сочетаниях, а координаты определяемых точек вычисляются по принципу арифметической середины. Вследствие этого упрощаются алгоритм и программа, а результаты практически получаются тождественными.

При таком своеобразном топологическом уравнивании фототриангуляционной сети и наличии на ее концах по две геодезических точки учитываются известные условия базисов (масштабов), азимутов (дирекционных углов) и поперечных наклонов снимков (поперечное кручение сети), а в случае добавления еще двух высотных точек для полного обеспечения конечных стереопар учитывается и условие продольных углов наклонов снимков (продольный прогиб сети), вследствие чего точность окончательных результатов повышается в среднем в два раза [3].

Кроме того, при таком уравнивании маршрутной фототриангуляции легко можно включить дополнительные независимые условия в виде измеренных промежуточных линий, азимутов, превышений, наклонов и др. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, при использовании таких двух-трех промежуточных и независимых условий в случае равномерного размещения в сети точность окончательных результатов повышается в 1,6—2,1 раза [3]. При этом следует отметить, что эффективность такого условия падает, если его поместить в середине маршрута.

Не исключена возможность включения дополнительной радиофизической бортовой измерительной информации. Например, можно успешно использовать пространственные координаты точек фотографирования, длины базисов фотографирования, расстояния от точек фотографирования до точек местности и данные глобальной системы местоопределения (GPS — Global Positioning System) [5]. Дополнительная измерительная информация включается в уравнивательный процесс фототриангуляционной сети согласно разработанной методике [4] через так называемые квазиопорные точки без увеличения числа определяемых параметров. Например, при включении координат центров фотографирования, полученных из глобальной системы местоопределения, в итеративном процессе топологического уравнивания они сохраняют первоначальные значения, т. е. не получают никаких поправок, а лишь после завершения итераций вычисляются их уравненные значения и выполняется оценка точности.

В близкосъемочной фотограмметрии при построении пространственно-огibaющих фототриангуляционных сетей нужно учесть положительные и отрицательные направления координат.

натных осей системы. При использовании функциональных зависимостей проективной коллинеарности в таком учете необходимости нет, в чем заключаются большие преимущества метода. Кроме того, в данном случае в качестве геодезической опоры в основном используются измеренные расстояния, превышения, вертикальные и горизонтальные линии или плоскости, имеющиеся в пространстве объекта.

Программа составлена на языке Фортран и реализована на мини-ЭВМ СМ-4 и ТВК-102. При ступенчатом решении задачи можно использовать микроЭВМ и персональные компьютеры, так как максимальный порядок решаемых нормальных уравнений не превышает одиннадцати или девяти.

В лабораториях архитектурной фотограмметрии Института проектирования реставрации памятников и инженерной фотограмметрии Вильнюсского университета модели проективной и перспективной коллинеарности фототриангулирования неоднократно применялись для построения цифровых моделей архитектурных объектов. Если сравнивать результаты, с данными, получаемыми при обычных методах триангулирования, то точность окончательных результатов в среднем повышается в два-три раза.

В заключение отметим, что удачное сочетание математических функциональных зависимостей компланарности и коллинеарности при построении и уравнивании маршрутных фототриангуляционных сетей позволило создать строгий алгоритм и программу триангулирования, обеспечивающих даже при минимальном объеме измерительной информации (шести точек на стереопару и девяти — на снимок) высокую точность окончательных результатов. При предлагаемом методе фототриангулирования используются все внутренние избыточные связи и измерения, производится самокалибровка снимков и браковка недоброкачественных измерений, вследствие чего повышается надежность результатов. Так как объем решаемых нормальных уравнений небольшой, то программа вычисления реализуется на мини-ЭВМ. Большое достоинство метода — возможность включения в уравнивательный процесс любой дополнительной измерительной информации либо в качестве исходной опоры использовать измеренные линии, превышения, горизонтальные и вертикальные линии или плоскости, что имеет практическое значение в близкосъемочной фотограмметрии. Разработанный строгий топологический метод уравнивания пространственной аналитической фототриангуляции, по сути, заменяет рекуррентный способ, применяемый для обработки больших геодезических построений. Преимуществом является также устранение полиномиального уравнивания, при котором всегда возникали неопределенности и неясности, особенно при оценке точности окончательных результатов. Следует отметить, что разработанный метод фототриангулирования можно успешно применять в случае использования неметрических снимков, что расширяет возможности фотограмметрии. Следовательно, в целях повышения эф-

фективности маршрутной аналитической фототриангуляции по достигаемой точности и надежности необходимо все имеющиеся в аэрофотогеодезическом производстве приближенные программы совершенствовать путем ввода строгого внешнего и внутреннего топологического уравнивания с оценкой точности окончательных результатов.

1. *Вайнаускас В. В., Палипайтис А. А.* Оптимальные алгоритмы в архитектурной фотограмметрии // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1984. Вып. 39. С. 118—127.
2. *Вайнаускас В. В., Ярутис Р. А.* Пространственное фототриангулирование по неметрическим снимкам // Геодезия и картография. 1987. № 10. С. 34—38.
3. *Вайнаускас В. В.* Пространственное фототриангулирование на приборах универсального типа с учетом условий азимутов, базисов и горизонтальных плоскостей // Науч. тр. высш. учеб. завед. ЛитССР. 19. Строительство и архитектура. 1963. Т. 11. С. 161—174.
4. *Вайнаускас В. В.* Использование дополнительной измерительной информации в фотограмметрии при построении проективных моделей // Геодезия и картография. 1989. № 5. С. 14—18.
5. *James R. Lucas.* Aerotriangulation without ground control // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1987. V. 53. P. 311—314.