

Б.Н.Родионов

ТРЕХЩЕЛЕВАЯ АЭРОСЪЕМКА

Щелевая аэросъемка изобретена в России в 1935 г инженером Виталием Семеновичем Семеновым [1] и применяется в отечественных ВВС с 1939 г. В 1943 г. она заимствована ВВС США [2].

В настоящее время в России эксплуатируется Цифровой топографический комплекс ЦТК-140 системы И.В.Полянского. Этот комплекс создан кооперацией ИКИ РАН и ГЦ «Природа» [3].

Упрощенная схема технологических процессов

Применена трехщелевая цифровая камера. Светочувствительным сенсором служат ячейки приборов с зарядовой связью, сложенных в линейки (ЛПЗС). Они реализуют щелевое наблюдение местности.

В фокальной плоскости объектива Руссар-43 с фокусным расстоянием $f=140\text{мм}$ расположены три группы линеек. Одна группа находится в центре поля изображения объектива и ориентирована перпендикулярно к направлению полета, две другие параллельны первой и находятся на краях поля изображения. Каждая группа линеек состоит из трех секций, сложенных так, что образуется одна вытянутая линейка со ступеньками. Ступенчатость не нарушает принципов щелевой съемки, в дальнейшем она нами игнорируется, и мы будем рассматривать каждую группу, как одну прямую линейку. Суммарное число ячеек в такой условной линейке равно 22000. Размер ячейки $dx \times dy = 0,007 \times 0,007 \text{ мм}$. Длина составной линейки, далее просто линейки, (ЛПЗС) $l_y = 154\text{мм}$

Центральная линейка создает отвесную визирную плоскость, боковые — наклонные визирные плоскости, ориентированные так, что одна из них направлена вперед по полету, другая — назад. Угол между отвесной плоскостью и боковыми равен 27 градусам. Расстояние в фокальной плоскости между центральной и боковыми плоскостями $v_x = 71,33 \text{ мм}$.

ПЗС генерируют электрические заряды, энергия которых пропорциональна яркости деталей оптического изображения, накрываемого линейкой, и времени накопления зарядов dt (выдержке). Время накопления задается так, что $dt = dx/w$, где w — скорость движения оптического изображения. С частотой $F=1/dt$ заряды на линейках опрашиваются — обнуляются. За время dt изображение перемещается в фокальной плоскости на расстояние, равное ширине ячейки ПЗС. Опрос всех линеек происходит синхрон-

но. Накопленные заряды образуют вдоль линеек зарядовые пакеты — строки. Они одно моментно переносятся в регистр оперативной памяти, ячейки обнуляются и накопленные заряды возобновляются.

Зарядовые пакеты из регистра оперативной памяти поступают в систему обработки, где из них формируется цифровое строчное изображение. Оно хранится в сменных накопителях (кассетах), как продукт щелевой съемки.

Заряды, генерируемые в упомянутых секциях составных линеек, поступают в обработку по отдельным каналам и в сменных накопителях образуется девять щелевых панорам. В дальнейшем они в необходимом порядке сшиваются в общие картины панорам снятой местности, а панорамы могут быть разделены на отдельные щелевые снимки эквивалентные снимкам покрупной съемки.

Получают три итоговые панорамы: отвесного, переднего и заднего обзора в панхроматическом диапазоне оптического излучения.

Геометрическая модель трехщелевой съемки (рис. 1)

Обозначения.

S — центр проекции (объектив); l — кадровое окно, реализующее фокальную плоскость объектива (Фп) и картинную плоскость (Кп) линейной перспективы; oxy — фотограмметрическая система координат на картинной плоскости; OSo — главный луч перспективы; f — фокусное расстояние объектива; NSn — вертикаль; $NXYZ$ — топоцентрическая (надирная) система координат (ось NY направлена на север); XNY — горизонтальная предметная плоскость (Пп); N, n — точки надира; O, o — главные точки предметной и картинной плоскостей; OXY прообраз на местности системы oxy ; $oxyz$ — техническая система координат фокальной плоскости; 2 — координатные метки оптической системы; x_0, y_0 — координаты на-



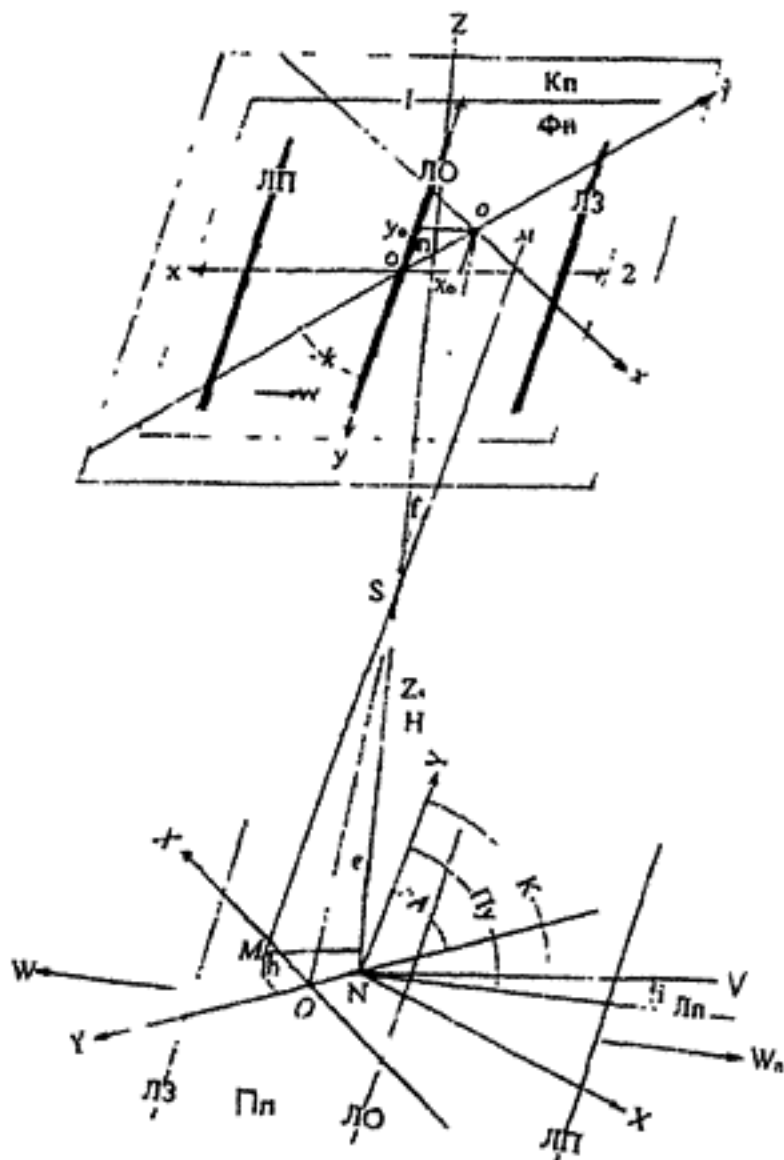


Рис. 1. Геометрическая модель щелевой цифровой аэро-съемки. Негативная проекция на момент T

чала системы oxy ; e — угол между главным лучом и вертикалью; k — угол между осями ox и ox' ; Z_s — высота над плоскостью XNY , M — точка местности, m — ее центральная проекция на картине. MSm — проектирующий луч, h — высота точки M над плоскостью XNY . На рис. 1 не показаны координаты X_s, Y_s, Z_s — центра проекции в геодезической системе координат. $H = Z_s - h$ высота съемки.

Далее: Wn — путевая скорость полета; $Лп$ — линия пути; $Пу$ — путевой угол; K — курс; i — угол сноса; $W = -Wn$ — скорость движения земной поверхности, наблюдаемая с самолета в фотолюк, w — скорость движения оптического изображения. При щелевой съемке ось абсцисс ox ориентируют по линии пути, e бывает меньше 3 градусов. Поэтому $ПУ = K + i$, $e \cdot \cos k = e_x$, $e \cdot \sin k = e_y$, A — угол между осями OY и Ny .

$ЛП, ЛО, ЛЗ$ — линейки ПЗС переднего, отвесного и заднего обзора. Системы OXY и oxy ортогональны. Прообраз oxy на плоскости XNY (на рис. 1 не показан) при $e \neq 0$ не ортогонален.

Совокупность $A-1 [f, x_0, y_0, //m_1//, //m_2//]$ содержит параметры, называемые элементами внутреннего ориентирования щелевой камеры. Два последние элемента в скобках есть матрицы дисторсии объектива и параметров ориентации ЛПЗС в системе координат oxy . Элементы внутреннего ориентирования являются константами, их определяют при калибровке аппаратуры. Совокупность $A-2 [A-1, X_s, Y_s, Z_s, e_x, e_y, A,$

$T]$ есть элементы внешнего ориентирования щелевой камеры в момент времени T . Совокупность $A-1$ вложена в совокупность $A-2$. Совокупность $A-3 [A-2, W_x, W_y, W_z, w_x, w_y, w_z, t]$ есть текущие элементы внешнего ориентирования щелевой камеры; t — время съемки текущей строки щелевой цифровой панорамы. W_x, y, z, W_x, y, z — составляющие путевой скорости по осям X, Y, Z и угловые скорости колебаний камеры вокруг осей x, y, z (на рис. 1 не показаны). Совокупности $A-1, A-2$ вложены в $A-3$.

Триангулирование по панорамам и снимкам. Версия Р

Для геометрических построений по изображениям необходимы декартовы системы координат. На фотоснимках система oxy маркирована впечатыванием координатных меток в момент экспозиции. Впечатанные метки служат неотъемлемой принадлежностью каждого снимка.

На цифровых панорамах система oxy создается замешиванием в цифровое изображение сигналов реперных меток в некоторые выбранные моменты t_x . Когда панорамы делят на отдельные снимки, эти метки целесообразно приурочить к моментам генерирования средней строки на снимке. Для удобства наблюдения снимки визуализируют и печатают на твердом носителе (бумаге, пленке). На визуализированных снимках центральная строка может быть высвечена или вычернена и станет осью oy . Начало координат и ось абсцисс могут быть маркированы по усмотрению.

Три линейки, показанные на рис. 1, в момент времени t синхронно «выхватывают» из движущегося оптического изображения три геометрически связанные строки — фрагменты линейной перспективы.

На единичной строке детали изображения не распознаются. Распознавание наступает, когда строки объединяются в пачку шириной $x = dx \cdot n$, где n — число строк, входящих в пачку. При $x = 10$ мм распознавание становится возможным. Это соответствует примерно 1500 строкам.

Три строки и три пачки строк на панорамах переднего, отвесного и заднего визирования, опрошенных синхронно, назовем триадой ($Тр$). В информационных полях, создаваемых в системе обработки данных трехщелевой съемки, $Тр$ представляются файлами из трех столбцовых (для строк) или колончатых (для пачек) матриц. Вопросов уплотнения записи мы не касаемся.

На рис. 2 показана схема формирования из щелевых панорам цифровых файлов, адекватных упомянутым триадам.

Цифрой 1 обозначена маршрутная панорама, получаемая линейкой $ЛП$ (см. рис. 1), цифрой 2 — панорама от $ЛО$, 3 — от $ЛЗ$. Слева на рис. 2 показана схема получения на панорамах обзора одной строки в мо-

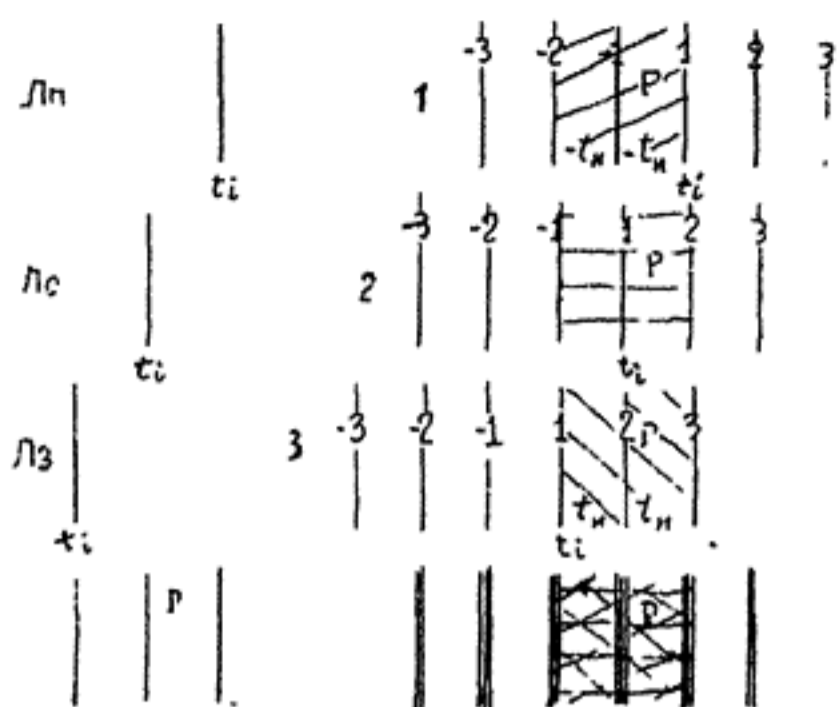


Рис. 2. Схема синтезирования триад и построения ряда триангуляции из триад

мент t . Внизу слева — макет совмещения панорам и синтезирования одиночного снимка с триадой. Расстояние между строками на синтезированном снимке равно B_x (рис. 1). Совмещение делается на компьютере и образуется файл — триада. Как уже было сказано, он состоит не из одиночных строк, а из пачек по 1500 строк шириной порядка 10 мм. На рисунке площадь изображения, эквивалентная топографическому снимку, обозначена P .

Если за начальный момент принять t , то в последующие моменты площадь P полностью может быть просмотрена только задней линейкой ЛЗ. Линейка ЛО просмотрит половину P , а ЛП не захватит P совсем. Но если рассматривать время ретроспективно, то на всех панорамах найдется изображение адекватное P . Это поясняет правая часть рис. 2.

Оптическое изображение местности, опрошенное ЛП в момент t_n , спустя интервал времени $t_n = v_x/w$ переместится в фокальной плоскости так, что будет опрошено ЛО. Спустя еще t_n это изображение переместится так, что будет опрошено ЛЗ.

Из панорам можно нарезать щелевые снимки, подобные топографическим снимкам, полученным с интервалом времени $t_n = v_x/w$, v_x — расстояние между линейками.

На рис. 2 показаны строки, маркированные в моменты $t = kt_n$. Здесь k — номер щелевого снимка. Внизу справа нарисована геометрическая схема совмещенных щелевых снимков и тройных перекрытий файлов — триад. В пределах пачек в 1500 строк щелевые снимки адекватны фрагментам линей-

ной перспективы, запечатленным на топографических снимках. То есть при описанном подходе из щелевых панорам получается линейчатая структура, аналогичная структуре из тройных перекрытий при покадровой съемке. На тройных перекрытиях выбирают связующие точки при триангулировании. К файлам — триадам можно применить те же приемы построения и обработки массивов информации, которые применяются при покадровой съемке топографическими камерами.

Рассмотрим некоторые специфические вопросы триангулирования по щелевым снимкам.

Минимизированным звеном маршрутной фототриангуляции служит триплет (термин А.Н.Лобанова), составленный из триад трех снимков. В триплете представлены все процедуры геометрической обработки снимков в сетях фототриангуляции. Маршрут получают, соединяя триплеты, совмещая идентичные связующие точки. В рядах фототриангуляции, создаваемых из снимков покадровой съемки, условий для внутреннего контроля нет. В рядах из щелевых снимков такой контроль возможен. Ввиду тройного перекрытия панорам можно на одну и ту же территорию составить независимые ряды многократно.

На рис. 3 цифрой 1 показан ряд фототриангуляции из четырех триплетов, составленных из триад Тр-1, Тр-2, Тр-3, Тр-4. Зоны тройных перекрытий заштрихованы. В таких триплетах обеспечены наилучшие геометрические условия построения фотограмметрических засечек под углами в 45 и 90 градусов. Цифрой 2 обозначен аналогичный ряд, но построенный из триад с центрами, сдвинутыми относительно первого на $B_x/2$. Оба эти ряда не имеют общих связующих точек и поэтому условно независимы. Чтобы связать эти два ряда надо точки одного ряда выразить через координаты другого ряда.

Изображение местности на щелевых снимках непрерывно, поэтому систему координат, маркиро-

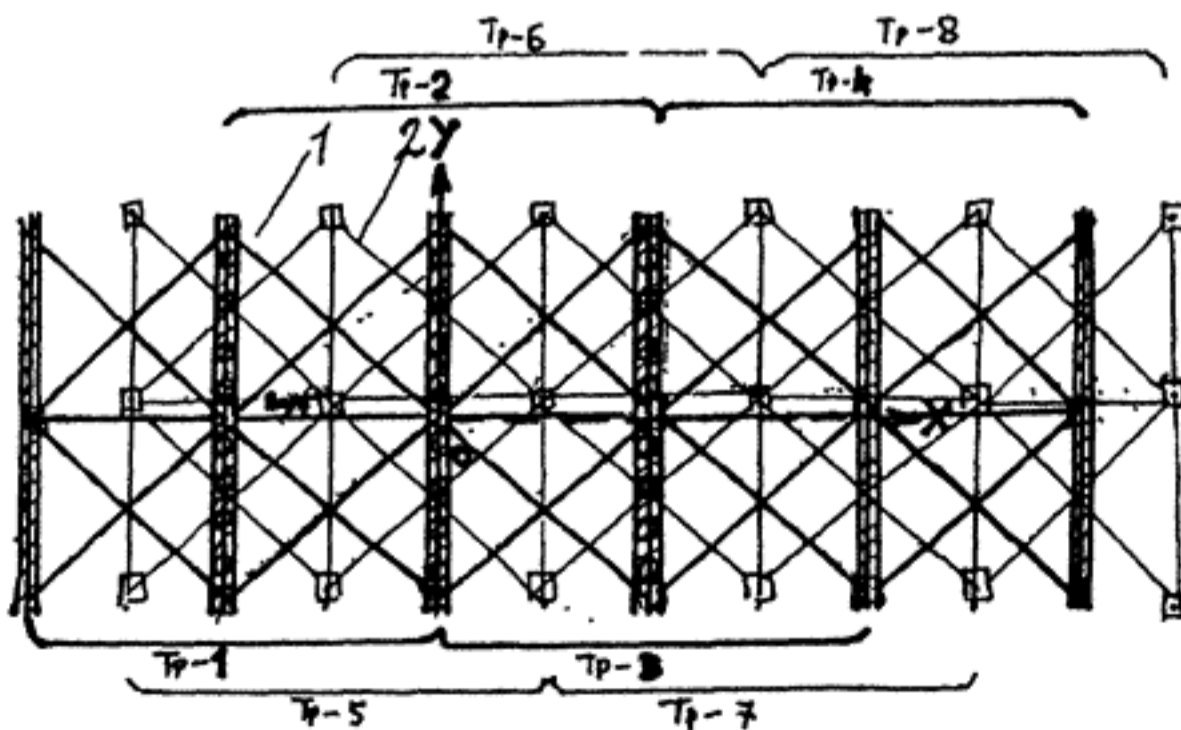


Рис. 3. Схема стыковки триплетов

ванную на одном снимке, легко распространить на соседние. Это можно сделать на снимках триплетов 1 и 5, показанных на рис.3. Измерив координаты связующих точек в системах перекрывающихся снимков, можно связать эти системы и пересчитать координаты в общую систему. Образуется единый блок из двух независимых рядов. Совместное уравнивание этих рядов повысит точность определений до 1,4 раза.

Основные связующие точки показаны квадратами. Кружками обозначены вспомогательные связующие точки, не используемые при построении основных рядов. Они могут быть пикетами при создании цифровой модели местности.

Если продолжить построение таких рядов, сдвигая их начала на $1/4, 1/8$ и так далее, то сеть связующих точек будет сгущаться. Ее можно довести до плотности достаточной для цифровой модели местности топографических карт.

Обработка данных щелевой съемки имеет специфику. Главным фактором, связывающим массивы данных и этапы, является единое для всего процесса обработки время T и локальное для отдельных этапов и процедур время t . При составлении проекта обработки следует упорядочить систему отсчета времени и его использования. Целесообразно образовать единые шкалы и систему индексации времени и привязку ко времени всех видов информации и звеньев обработки.

Ориентировочный порядок построения рядов триангуляции по панорамам, поставляемым ЦТК-140, можно представить таким:

1. Разделение панорам переднего, отвесного и заднего визирования на щелевые снимки с перекрытием 60%. Маркирование систем координат oxy .

2. Выделение на снимках ЛО центральных столбцов шириной 10–15 мм. Столбцы располагают по оси ординат симметрично оси. Расстояние между столбцами по оси абсцисс равняется базису съемки b_x .

3. Выделение на снимках Лп и Лз столбцов изображения идентичных столбцам Ло. Вводится единая индексация всех столбцов.

4. Формирование триад и файлов каждого снимка в виде столбцов с одинаковой индексацией.

5. На файлах Ло намечают зоны связующих точек.

6. Идентифицируют и измеряют координаты связующих точек. Состав-

ляют схему расположения точек и протокол измерения их координат.

7. Первый вариант сети триангуляции строится по традиционным методикам, описанным в раннем пособии [4], или по программным продуктам предприятий пользователей, например, «ЦФС ТАЛКА» и других. Используют априорную информацию, содержащуюся в А-1, А-2, А-3. Входящие в А-3 элементы внешнего ориентирования получают по показаниям бортовой системы ориентации и стабилизации или по данным навигации, как данные нулевого приближения. Для масштабирования и азимутального ориентирования используют топографические карты.

8. В результате стандартных процедур получают протокол со значениями координат центров проекции X_s, Y_s, Z_s и со значениями угловых элементов ориентирования e_x, e_y, k щелевых снимков (их триад), i_x, i_y — углов наклона базисов стереопар, входящих в сеть, координаты X, Y, Z точек местности, образующих ее цифровую модель.

9. Строится и вычисляется второй, третий и последующие варианты сетей. Их координаты приводят к единой системе и уравнивают с учетом весовых коэффициентов. Получают цифровую модель местности с нужной плотностью точек.

Литература

1. В.С. Семенов. Авторское свидетельство № 113030. В03. В 77100. Заявлено 25 октября 1935 г. № 178900.
2. А.И. Шершень. Аэрофотосъемка. Летносьемочный процесс. М. Геодиздат. 1949.
3. Авиационные цифровые съемочные комплексы. Буклет. АНО «Космос-НТ», 2002.
4. Фототриангуляция с применением электронной цифровой вычислительной машины. «Недра». М. 1967.

