

## Оперативное формирование обзорных изображений по данным аэрофотосъемки

А.С. Рыжиков, А.Е. Кузнецов

*Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, 390005, Россия*

*E-mail: foton@rsreu.ru*

Рассматривается алгоритм синтеза непрерывного изображения земной поверхности из отдельных перекрывающихся кадров. Алгоритм основан на определении закона геометрического совмещения снимков с использованием координат одноименных точек, идентифицируемых в общих областях соседних кадров. Приводятся примеры практического использования алгоритма для геометрического совмещения кадров, полученных в ходе аэрофотосъемки с использованием цифрового фотоаппарата. В работе отражены особенности использования алгоритма Харриса для надежной идентификации одноименных точек на анализируемых изображениях. Исследуются вопросы определения адекватных математических моделей, позволяющих выполнять качественное совмещение снимков.

**Ключевые слова:** кадровые съемочные системы, закон координатного соответствия, координаты одноименных точек.

### Введение

При кадровой аэрофотосъемке формируется набор отдельных перекрывающихся между собой снимков  $\mathbf{B}_k = [b_k(x, y)]$ , где  $b_k(x, y)$  – яркость пикселя с координатами  $(x, y)$ ,  $x = \overline{1, X}$ ,  $y = \overline{1, Y}$ ,  $k$  – номер кадра в маршруте съемки,  $k = \overline{1, K}$ . Для формирования из набора снимков  $\mathbf{B}_k$  непрерывного изображения маршрута съемки традиционно используется технология, основанная на геометрическом трансформировании кадров в картографическую систему координат по данным элементов внешнего и внутреннего ориентирования съемочного устройства (Назаров, 2006; Кузнецов, Нефедов, 2013). Однако в ряде случаев, например, при аэрофотосъемке цифровым фотоаппаратом или при сбоях в работе навигационного оборудования, элементы внешнего ориентирования отсутствуют. Тогда для оперативной «сшивки» отдельных кадров в одно непрерывное изображение  $\mathbf{B} = [b(x, j)]$ , где  $x = \overline{1, X}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $J < KY$ , может быть использован регрессионный алгоритм.

Алгоритм основан на том, что параметры функций геометрического совмещения кадров определяются на основе координат одноименных точек, расположенных в перекрывающихся частях соседних изображений. Подобный подход используется в работе (Толстая, 2011) для получения панорамного изображения из отдельных кадров. Причем параметры геометрического совмещения  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров представляются в виде аффинной функции:

$$\begin{aligned}x^* &= a_0 + a_1x + a_2y, \\y^* &= c_0 + c_1x + c_2y,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $(x^*, y^*), (x, y)$  – координаты пикселя  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров, соответственно;  $(a_0, a_1, a_2), (c_0, c_1, c_2)$  – коэффициенты преобразования, рассчитываемые на основе координат одноименных точек  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров. К сожалению, при аэросъемке каждый кадр подвержен проективным геометрическим искажениям, которые описываются уравнениями вида:

$$\begin{aligned} u &= \frac{a_1x + a_2y + a_0}{c_0x + c_1y + 1}, \\ v &= \frac{d_1x + d_2y + d_0}{c_0x + c_1y + 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $(u, v)$  – координаты точки снимка на земной поверхности;  $(a_0, a_1, a_2), (d_0, d_1, d_2), (c_0, c_1)$  – параметры преобразования, что приводит к сложным взаимным искажениям «сшиваемых» кадров (рис. 1). Это не позволяет использовать уравнения (1) для формирования непрерывного изображения  $\mathbf{B}$ .

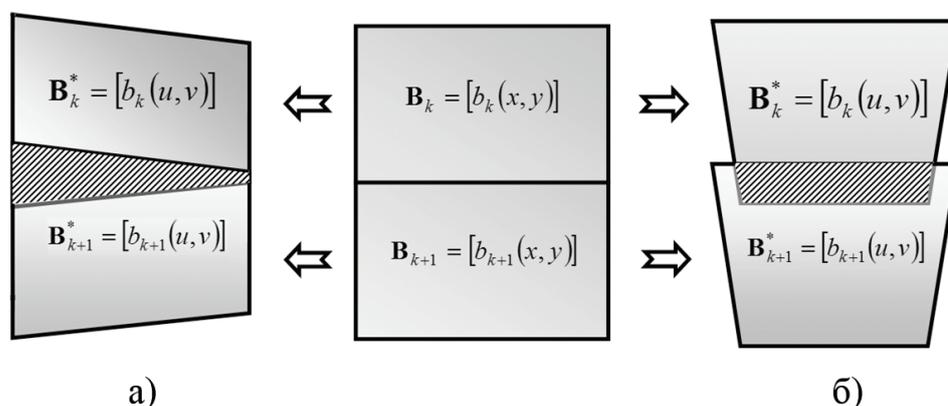


Рис. 1. Пример взаимного расположения  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров на земной поверхности при углах крена (а) и тангажа (б) съемочного устройства

Цель работы состоит в разработке математических соотношений, используемых для синтеза непрерывного аэрокосмического изображения земной поверхности из набора перекрывающихся кадров, которые формируются в условиях аэрокосмической съемки.

### Алгоритм «сшивки» кадров

Формирование непрерывного изображения будем осуществлять путем последовательного геометрического трансформирования  $(k+1)$ -го кадра в систему координат  $k$  с использованием соотношения

$$b_k(F_x(x, y), F_y(x, y)) = b_{k+1}(x, y),$$

где  $x^* = F_x(x, y), y^* = F_y(x, y)$  – искомые уравнения геометрического соответствия между системой координат базового  $(x^*, 0, y^*)$  и присоединяемого  $(x, 0, y)$  кадров.

Особенности нахождения функций  $F_x, F_y$  состоят в следующем.

Во-первых, из-за отличий в перспективе съемки  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров их общие области геометрически искажены друг относительно друга и в общем случае обладают различной яркостью. В результате одни и те же высотные объекты имеют различное представление в общих областях совмещаемых изображений. Все это затрудняет непосредственное использование метода корреляционно-экстремального отождествления для нахождения координат одноименных точек и восстановления по ним функций  $F_x, F_y$ .

Во-вторых, по координатам одноименных точек определяются параметры функции геометрического совмещения двух кадров в пределах общих областей. При этом весь  $(k+1)$ -й кадр преобразуется так, что нарушается закон координатного соответствия с  $(k+2)$ -м кадром. То есть встает задача построения такой модели координатного соответствия кадров, которая распространялась бы только на область совмещения кадров и не приводила к изменению геометрических размеров синтезируемого непрерывного маршрута съемки.

С учетом отмеченных особенностей предлагается многоэтапный алгоритм нахождения искомых функций  $F_x, F_y$ .

### *Этап 1. Приближенное определение области перекрытия соседних кадров*

Для обеспечения независимости корреляционной функции от яркостных различий соседних кадров осуществим переход от значений яркости каждого пикселя к величине градиента яркости в данной точке:

$$\begin{aligned} S: \mathbf{B}_k &\rightarrow \mathbf{G}_k = \{g_k(x, y)\}, \\ S: \mathbf{B}_{k+1} &\rightarrow \mathbf{G}_{k+1} = \{g_{k+1}(x, y)\}, \end{aligned}$$

где  $S$  – оператор Собеля (Прэтт, 1982),  $\mathbf{G}_k, \mathbf{G}_{k+1}$  – контурные представления  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров.

Будем считать, что съемка земной поверхности выполняется с перекрытием соседних кадров не более чем на 50%. С учетом этого верхнюю часть изображения  $\mathbf{G}_{k+1}$  разобьем на множество квадратных фрагментов  $Z_t, t = \overline{1, T}$ . Размер каждого фрагмента выберем так, чтобы он составлял половину от предполагаемой области перекрытия кадров. Обозначим через  $dx_t, dy_t$  смещение центра фрагмента  $Z_t$ , идентифицированного в области определения кадра  $\mathbf{G}_k$ . Смещения  $dx_t, dy_t$  найдем из условия:

$$(dx_t, dy_t) = \arg \min_{dx_t, dy_t} \left[ \frac{1}{|Z_t|} \sum_{y=0}^{Y/4} \sum_{x=0}^{X/4} |g_{k+1}(x, y) - g_k(x', y')| \right], x' = x + dx_t, y' = y + dy_t, dx_t = dy_t = \overline{0, Y/4},$$

где  $|Z_t|$  – число точек в фрагменте  $Z_t$ .

Проверим валидность найденных смещений с помощью алгоритма обратного поиска (Толстая, 2011). Для этого будем искать положение фрагмента  $Z_t$  в области определения  $\mathbf{G}_{k+1}$ . Если смещения, найденные при прямом и обратном поиске, отличаются не более чем на 1, то значения  $dx_t, dy_t$  будем считать достоверными.

Усреднив полученные после проверки смещения  $dx_t, dy_t$ , получим смещение  $dx, dy$   $(k+1)$ -го кадра относительно  $k$ -го и тем самым определим приближенные значения ширины  $W$  и высоты  $H$  области перекрытия  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров соответственно.

### Этап 2. Определение координат одноименных объектов

Для надежной идентификации одноименных объектов, расположенных в перекрывающихся частях  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров, применим детектор Харриса (Гонсалес, Вудс, 2000). Этот оператор позволяет выделить на изображении характерные точки, в окрестности которых у градиента изображения два доминирующих направления. Для определения характерных точек  $k$ -го кадра выполним последовательность шагов.

С использованием фильтра Гаусса с окном  $3 \times 3$  выполним сглаживание той части кадра, которая имеет перекрытие с  $(k+1)$ -м кадром:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{B}_k \otimes \mathbf{S}_l,$$

где  $\otimes$  – операция свертки с окном  $\mathbf{S}_l = [s_{ij}]$ ,  $s_{ij} = \frac{1}{2\pi l} e^{-(i^2+j^2)/2l}$ ,  $i = j = \overline{1, l}$ ,  $l = 3$ .

Далее с использованием оператора Собеля выполним дифференцирование изображения  $\mathbf{V}_k$ :

$$\mathbf{V}_{kx} = \mathbf{V}_k \otimes \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V}_{ky} = \mathbf{V}_k \otimes \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Затем полученные контурные изображения вновь подвергнем гауссовской фильтрации в окне  $11 \times 11$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{kx} &= [q_{kx}(x, y)], \mathbf{I}_{kx} = \mathbf{V}_{kx}^2 \otimes \mathbf{S}_l, \\ \mathbf{I}_{ky} &= [q_{ky}(x, y)], \mathbf{I}_{ky} = \mathbf{V}_{ky}^2 \otimes \mathbf{S}_l, \\ \mathbf{I}_{kxy} &= [q_{kxy}(x, y)], \mathbf{I}_{kxy} = \mathbf{V}_{kx} \mathbf{V}_{ky} \otimes \mathbf{S}_l. \end{aligned}$$

Здесь размер окна устанавливается в зависимости от пространственного разрешения кадров.

Составим симметричную матрицу производных в точке  $(x, y)$ :

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} q_{kx}(x, y) & q_{kxy}(x, y) \\ q_{kxy}(x, y) & q_{ky}(x, y) \end{bmatrix}.$$

Характерные точки имеют значительную величину собственных чисел  $\lambda_1, \lambda_2$  матрицы  $\mathbf{I}$ , поэтому определим множество координат характерных точек  $b_k(x_\xi, y_\xi)$ , для которых значение  $R(x, y) = \det \mathbf{I} - \theta \cdot \text{tr} \text{ce} \mathbf{I}$  максимально, где  $\theta = 0,04$  – эмпирический коэффициент.

В заключение с использованием аппарата корреляционного поиска для каждой точки  $b_k(x_\xi, y_\xi)$  найдем ее образ в системе координат  $(k+1)$ -го кадра. Найденные значения обозначим как  $b_{k+1}(x_\xi^*, y_\xi^*)$ .

### *Этап 3. Определение параметров математической модели совмещения кадров*

Искомые уравнения  $F_x, F_y$  построим на основе формулы проективного преобразования (2). Для сохранения координатного соответствия преобразуемого и последующего кадров обеспечим неизменность  $(k+1)$ -го кадра в области перекрытия с  $(k+2)$ -м путем плавного «ослабления трансформации» по всей площади кадра. Для этого введем функцию:

$$h(y) = \begin{cases} 1, & y < H_k, \\ 0, & y > H_{k+1}, \\ 1 - \frac{y - H_k}{H_{k+1} - H_k}, & H_k \leq y \leq H_{k+1}, \end{cases}$$

где  $H_k$  – высота области пересечения  $k$ -го и  $(k+1)$ -го кадров,  $H_{k+1}$  – высота области пересечения  $(k+1)$ -го и  $(k+2)$ -го кадров.

Модифицированный закон проективного преобразования определим следующим образом:

$$\begin{aligned} F_x(x, y) &= h(y) \frac{a_1 x^* + a_2 y^* + a_0}{c_0 x^* + c_1 y^* + 1} + (1 - h(y))x, \\ F_y(x, y) &= h(y) \frac{d_1 x^* + d_2 y^* + d_0}{c_0 x^* + c_1 y^* + 1} + (1 - h(y))y. \end{aligned} \quad (3)$$

Конкретные значения коэффициентов преобразования вычислим с использованием множеств одноименных точек  $b_k(x_\xi, y_\xi)$ ,  $b_{k+1}(x_\xi^*, y_\xi^*)$ , для которых достигается минимум функции невязок:

$$f = \left( x_\xi - \frac{a_1 x_\xi^* + a_2 y_\xi^* + a_0}{c_0 x_\xi^* + c_1 y_\xi^* + 1} \right)^2 + \left( y_\xi - \frac{d_1 x_\xi^* + d_2 y_\xi^* + d_0}{c_0 x_\xi^* + c_1 y_\xi^* + 1} \right)^2.$$

Минимизацию функции выполним методом Левенберга–Маркварда с использованием начальных приближений  $a_1 = d_2 = 1$ ,  $a_0 = a_2 = d_0 = d_1 = c_0 = c_1 = 0$  (Гилл, Мюррей, 1985).

### Результаты испытаний

Описанный алгоритм реализован в виде программного модуля на языке C++. Для экспериментальной апробации алгоритма использованы кадры, сформированные в ходе аэрофотосъемки цифровым фотоаппаратом системы «Агрос». Размер каждого изображения 7216x5412 пикселей, площадь области пересечения соседних кадров составляет от 25% до 50% площади кадра.

Число найденных одноименных точек в зависимости от типа местности представлено в *таблице*. Для определения параметров функций (3) достаточно 5 пар равномерно распределенных одноименных точек, из чего следует, что предложенный пошаговый алгоритм корреляционно-экстремального отождествления гарантированно обеспечивает нахождение необходимого количества точек для построения функций геометрического соответствия.

Таблица. Число обнаруженных одноименных точек

Сюжет	Лес	Город	Поля
Число точек	17 - 48	25 - 69	13 - 45

Невязки функции (3) для всех кадров не превышают 5 пикселей. На *рис. 2* представлен фрагмент непрерывного изображения, сформированного из отдельных снимков местности смешанного типа. На *рис. 3* изображен увеличенный участок этого изображения в месте стыка соседних кадров.



*Рис. 2. Фрагмент синтезированного изображения*



*Рис. 3. Пример высокоточного совмещения соседних кадров*

### **Заключение**

Разработанный алгоритм формирования непрерывного изображения земной поверхности из набора перекрывающихся кадров показал высокую эффективность при обработке материалов аэрофотосъемки в условиях отсутствия информации о размерах области пересечения кадров и их взаимных яркостных и координатных искажений.

## Литература

1. Назаров А. С. Фотограмметрия: учебн. пособие для студентов вузов. Минск: ТетраСистемс, 2006. 368 с.
2. Кузнецов А.Е., Нефедов В.И. Модели цифрового совмещения гидрометеорологической спутниковой информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. №3 (45). С.8-13.
3. Толстая Е.В. Способы и алгоритмы трансформации цифровых изображений на основе анализа и обработки метаданных при подготовке к фотопечати: дис. канд. техн. наук. Рязан. гос. радиотехн. ун-т, Рязань, 2011.
4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 311 с.
5. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2010. №1. С.16-21.
6. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2000. 1072 с.
7. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.

## Instant generation of aerial photography previews

A.S. Ryzhikov, A.E. Kuznetsov

Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

E-mail: foton@rsreu.ru

We present an algorithm of synthesis of seamless images of the Earth surface based on a set of overlapping frames. The algorithm calculates parameters of the geometric law of image matching depending on coordinates of the reference points identified in overlapping areas of adjacent frames. Examples of the algorithm application to geometric matching of frames obtained by aerial photography using a digital camera are provided. In this paper we discuss peculiarities of using Harris detector for reliable identification of reference points in images for further analysis. Also we investigate the problem of constructing mathematical models enabling high-quality image fusion.

**Keywords:** frame camera system, law of coordinates conformity, reference points.

## References

1. Nazarov A. S. *Fotogrametrija: uchebn. posobie dlja studentov vuzov* (Photogrammetry: a textbook for university students), Minsk: TetraSistems, 2006, 368 p.
2. Kuznetsov A.E., Nefedov V.I. Modeli cifrovogo sovmeshhenija gidrometeorologicheskoj sputniko-voj informacii (Model combining digital satellite hydrometeorological information), *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2013, No. 3 (45), pp. 8-13.
3. Tolstaja E.V. *Sposoby i algoritmy transformacii cifrovyh izobrazhenij na osnove analiza i obrabotki metadannyh pri podgotovke k fotopechati* Diss. cand. techn. nauk (The methods and algorithms for the transformation of digital images based on the analysis and processing of metadata in preparation for printing), Candidate's tech. sci. thesis, Rjazan. gos. radiotehn. un-t, 2011.
4. Prjett U. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* (Digital Image Processing), Moscow: Mir, 1982, 311 p.
5. Kuznetsov A.E., Poshehonov V.I. Informacionnaja tehnologija stereofotogrammetricheskoj obrabotki videodannyh ot mnogomatrixnyh skanirujushhijh ustrojstv (Information technology stereophotogrammetric video processing from multimatrix scanners), *Cifrovaja obrabotka signalov*, 2010, No. 1, pp.16-21.
6. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* (Digital image processing), Moscow: Tehnosfera, 2000, 1072 p.
7. Gill P.E., Murray W., Wright M.H. *Prakticheskaja optimizacija* (Practical optimization), Moscow: Mir, 1985, 509 p.