

УДК 004.932.2

## ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ГЕОПРИВЯЗКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ОПОРНЫМ СНИМКАМ ОТ КА «LANDSAT-8»

*Кузнецов А.Е., д.т.н., зам. директора НИИ «Фотон» Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ), e-mail: foton@rsreu.ru;  
Пошехонов В.И., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ;  
Рыжиков А.С., техник НИИ «Фотон» РГРТУ.*

### AUTOMATIC GEOREFERENCE ACCURACY CONTROL TECHNOLOGY BASED ON REFERENCE PICTURES FROM THE OBSERVATION SATELLITE «LANDSAT-8»

*Kuznetsov A.E., Poshehonov V.I., Ryzgikov A.S.*

*The technology of automatic control of precision geodetic reference satellite images in the article is described. The technology consists of two parts. First, the creation of a reference data bank. Second, the mechanism of identification of similar objects on the analyzed and the reference image. In the article described the algorithm of a creation of the global bank of reference raster data, based on images of observation satellite «Landsat-8». Also, proposed a reliable and high-performant mechanism of identification of equivalent points on multi-temporal satellite images. This mechanism is based on the comparison of the descriptors of specific fragments.*

**Keywords:** control of precision geodetic reference, raster data bank, points coregistration.

**Ключевые слова:** контроль точности геопривязки, банк растровых данных, идентификация одноименных точек.

#### Введение

В настоящее время на центрах приема и обработки спутниковой информации операция контроля точности геопривязки материалов съемки от космических аппаратов высокого пространственного разрешения является обязательной. Это объясняется тем, что по навигационным измерениям положения и ориентации КА не всегда обеспечивается требуемая точность геодезической привязки изображений земной поверхности. Например, при штатной работе звездных датчиков КА «Канопус-В» ошибки координатной привязки маршрутов съемки не превосходят 60 м. Однако встречаются ситуации, когда из-за сильного углового движения или «засветки» астродатчика резко снижается точность определения углового положения спутника, что приводит к ошибкам геопривязки видеоданных от 1.5 – 2 до 4 км. Поэтому для выявления подобных маршрутов необходимо сравнивать геодезические координаты представленных на снимке характерных объектов с опорными значениями.

Операция оценки координатного рассогласования выполняется в ручном режиме с использованием картографических сервисов Google Maps, Яндекс Карты и др., предоставляющих возможность измерения геодезических координат и высоты указываемых оператором на экране объектов. Очевидно, что при ручном контроле каждого маршрута съемки и зависимости этого процесса от Internet-ресурсов нельзя организовать автомати-

*Рассмотрена технология автоматического контроля точности геодезической привязки спутниковых изображений, включающая создание опорного банка данных и механизм идентификации одноименных объектов на анализируемом и опорном изображениях. Описывается алгоритм создания глобального банка опорных растровых данных на основе снимков КА «Landsat-8». Предложен надежный и высокопроизводительный механизм идентификации одноименных точек на разновременных спутниковых изображениях, основанный на сопоставлении дескрипторов характерных фрагментов.*

ческую обработку и каталогизацию видеоданных, что очень важно для достижения высокой производительности наземного комплекса обработки и оперативного обслуживания потребителей. Поэтому целью работы является разработка технологии автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений, не зависящей от внешних ресурсов. Поставленная цель достигается решением двух задач: созданием опорного растрового банка данных на заданную территорию и разработки высоконадёжного и высокопроизводительного механизма поиска одноименных точек на анализируемом и опорном изображениях.

#### Проектирование опорного банка данных

В работе [1] рассматриваются вопросы уточнения геопривязки изображений от китайского спутника по данным от КА «Landsat-8». Геокодированные снимки от этого КА находятся в открытом доступе по адресу <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Точность геокодирования панхроматических изображений с пространственным разрешением 15 м по критерию CE 90 составляет не менее 12 м. Изображения представлены отдельными

кадрами размером 190x190 – 195x195 км. Поэтому информацию от этого спутника будем использовать для создания опорного банка данных.

К сожалению, на базе отдельных кадров крайне затруднительно организовать высокоскоростной поиск одноименных сюжетов на анализируемом и опорном изображениях. Поэтому, по аналогии с картографическими сервисами, создадим многомасштабное непрерывное растровое покрытие опорной территории земной поверхности. Для этого трансформируем каждый кадр от КА «Landsat-8» из проекции UTM в непрерывную проекцию Меркатора, используя уравнения обратного геометрического преобразования,

$$x' = F(x, y), y' = \Phi(x, y), \quad (1)$$

где  $(x', y')$  и  $(x, y)$  – планарные координаты пикселей в проекции UTM и Меркатора соответственно;  $(F, \Phi)$  – уравнения, описывающие пересчет координат пикселей из проекции Меркатора в проекцию UTM. Для проекции Меркатора, в отличие от большинства картографических Web-сервисов, используем точные уравнения картографического проектирования,

$$x = a \cdot \lambda,$$

$$y = a \cdot \ln \left[ \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \cdot \left( \frac{1 - e \cdot \sin(\phi)}{1 + e \cdot \sin(\phi)} \right)^{e/2} \right], \quad (2)$$

где  $\lambda, \phi$  – долгота и широта пикселя с координатами  $(x, y)$ ;  $a, e$  – значения большой полуоси и эксцентриситета эллипсоида.

Для организации многомасштабного пирамидального представления опорного изображения  $B_i, i = \overline{0, I}$ , где  $i$  – номер слоя в пирамиде, трансформирование будем выполнять с разными значениями параметра  $a$ ,

$$a = a_i = \frac{2\pi}{L_i}, \quad (3)$$

где величина  $L_i$  соответствует размеру изображения  $B_i$  и определяется соотношением

$$L_i = 2^{I-i} \cdot L_{\min}, \quad (4)$$

где  $L_{\min} = 256$ .

Пространственное разрешение слоя  $i$  на широте  $\phi$

$$r_{i\phi} = \frac{\cos(\phi)L_e}{L_i}, \quad (5)$$

где  $L_e$  – длина экватора в метрах. При добавлении в банк данных снимка осуществляется поиск слоя  $i$ , для которого выполняется соотношение  $a$ , где  $\phi'$  – широта центра снимка,  $R$  – его разрешение. Далее с использованием уравнений (2) растровые кадры трансформируются в проекцию Меркатора и формируют изображение  $B_i$ .

Слои пирамиды представляют собой изображения значительного размера. Поэтому для работы с такими растрами используем механизм тайловой организации данных. Непрерывные изображения хранятся в виде тайлов – квадратных растров размером  $L_{\min} \times L_{\min}$ . Количество тайлов, из которых состоит слой  $i$ , определяется значением  $4^{I-i}$ , а сторона слоя состоит из  $T_i = 2^{I-i}$  тайлов. По заданным индексам тайла достаточно просто найти соответствующий фрагмент изображения  $B_i$ .

Обозначим  $g = \overline{0, T_i}, k = \overline{0, T_i}$  – индексы тайла по осям  $x, y$  соответственно,  $(m, n)$  – координаты точки внутри тайла. Тогда точка  $O'(m, n)$  тайла  $D_{k,g}$  эквивалентна точке  $O'(x_0, y_0)$  виртуального изображения  $B_i$ , где

$$\begin{aligned} x_0 &= g \cdot L_{\min} + n, \\ y_0 &= k \cdot L_{\min} + m. \end{aligned} \quad (6)$$

Обратное отображение так же элементарно:

$$k = \text{ent} \left[ \frac{y_0}{L_{\min}} \right], k = \text{ent} \left[ \frac{x_0}{L_{\min}} \right], \quad (7)$$

$$n = x_0 \bmod (L_{\min}), m = y_0 \bmod (L_{\min}),$$

где  $\text{ent}$  – оператор взятия целой части.

Таким образом, при извлечении фрагментов непрерывного изображения используются только те тайлы, которые необходимы в данный момент, что позволяет избежать «холостых» обращений к дисковой памяти, уменьшить число кэш-промахов и увеличить скорость выдачи опорного растра.

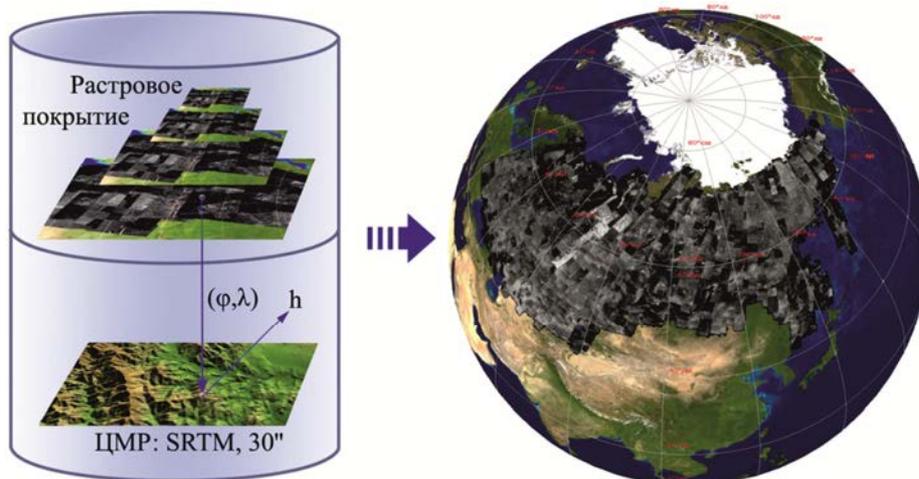


Рис.1. Структура банка опорной информации и пример растрового покрытия территории РФ данными от КА «Landsat-8»

На заключительном этапе формирования опорного банка данных подключим к растровому покрытию  $B_i$  цифровую модель рельефа SRTM (данные находятся в открытом доступе по адресу <http://srtm.csi.cgiar.org>) с тем, чтобы обеспечить возможность измерения в опорной точке не только геодезических координат, но и высот объектов. На рис. 1 показана структура банка опорной информации и растровое покрытие, сформированное на территории РФ и стран СНГ.

### Алгоритм автоматического обнаружения одноименных точек на опорном и анализируемом изображениях

Задача обнаружения одноименных точек и вычисления их координатных рассогласований имеет ряд особенностей.

Во-первых, непрерывное покрытие  $B_i$  синтезировано из одновременных снимков, которые могут существенно отличаться по текстуре от анализируемого изображения  $B'$ , что делает крайне ненадежной работу процедуры площадной корреляции. Пример таких снимков изображен на рис. 2 (пунктиром выделены одноименные области с различающейся текстурой).

Во-вторых, анализируемые изображения  $B'$  представляют собой массивы сверхбольшого объема (от нескольких десятков до сотен гигабайт), которые могут иметь координатные рассогласования с опорным сним-

ком до нескольких сотен пикселей. При этом оценка этого рассогласования должна выполняться быстро и практически со 100 % надежностью.

Исходя из перечисленных особенностей, проанализируем возможные решения по поиску на снимках одноименных точек. Так, в работе [2] для учета значительных взаимных координатных рассогласований поиск одноименных объектов выполняется по пирамиде изображений  $B_i'$ ,  $B_i$ . Для исключения влияния текстуры сюжетов изображения предварительно приводят к контурному виду, а результаты корреляционного сопоставления анализируются с помощью целой группы статистических проверок вида корреляционной функции. К сожалению, этот подход для случаев, показанных на рис. 2, из-за низкого коэффициента корреляции приводит к большой доле ложных сопоставлений.

Для повышения надежности площадной корреляции, во-первых, будем анализировать фрагменты изображений  $B_i'$ , содержащие характерные объекты. В качестве детектора характерных объектов будем использовать детектор Харриса [3]. Этот оператор позволяет находить на изображениях характерные точки, в окрестности которых у градиента изображения имеются два ярко выраженных доминирующих направления. Для их обнаружения выполняется последовательность шагов.

Сгладим изображение  $B'$  с использованием фильтра Гаусса с окном  $3 \times 3$ .

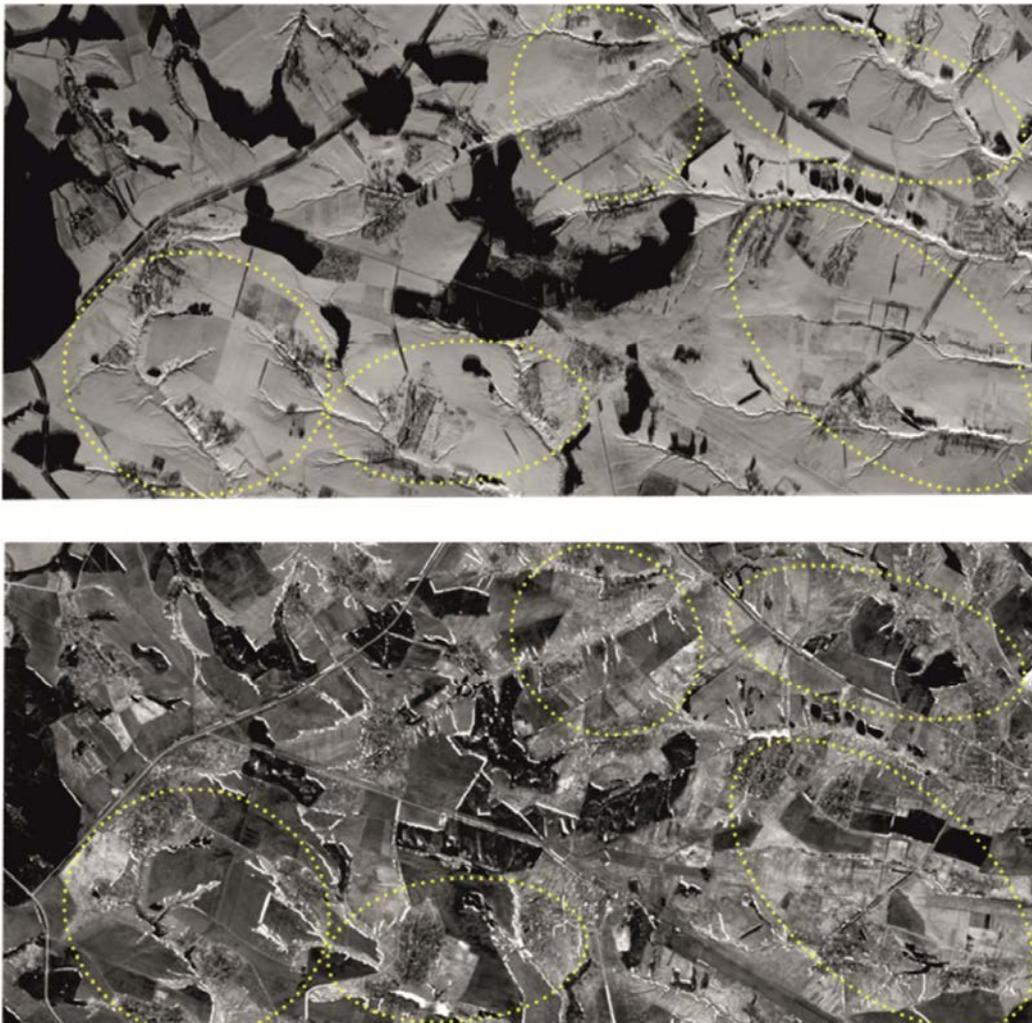


Рис. 2. Изображения одновременных снимков от КА «Канопус-В» и «Landsat-8»

Продифференцируем полученное изображение путем свертки с окнами  $(-1 \ 0 \ 1)$ ,  $(-1 \ 0 \ 1)^T$ . На этом шаге формируются массивы производных  $B'$ ,  $\partial B'_x = \{\partial b'_x(x, y)\}$ ,  $\partial B'_y = \{\partial b'_y(x, y)\}$  по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

Сформируем массивы  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_{xy}$ , характеризующие скорость изменения градиента по горизонтали, вертикали и диагонали соответственно:

$$\begin{aligned} V_x &= \{v_x(x, y)\} = \partial b'_x(x, y) \cdot \partial b'_x(x, y), \\ V_y &= \{v_y(x, y)\} = \partial b'_y(x, y) \cdot \partial b'_y(x, y), \\ V_{xy} &= \{v_{xy}(x, y)\} = \partial b'_x(x, y) \cdot \partial b'_y(x, y). \end{aligned} \quad (8)$$

Сгладим массивы  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_{xy}$  фильтром Гаусса с окном  $S \times S$ , причем размер  $S$  задает масштаб, в котором будут определены характерные точки.

Сформируем симметричные матрицы производных для каждой точки  $(x, y)$  анализируемого изображения,

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} v_x(x, y) & v_{xy}(x, y) \\ v_{xy}(x, y) & v_y(x, y) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Характерные точки имеют значительную величину собственных значений матрицы  $\mathbf{I}$ . После выполнения последнего шага строится множество координат характерных точек, для которых значение

$$R(x, y) = \det \mathbf{I} - \mathcal{G} \cdot \text{trace } \mathbf{I} \quad (10)$$

превышает заданный порог, где  $\mathcal{G} = 0.04$  – эмпирический коэффициент.

Во-вторых, для отбраковки ложных сопоставлений будем использовать метод обратного поиска. Его суть состоит в следующем: после нахождения образа фрагмента  $T'$  на изображении  $B_i$ , осуществляется поиск образа фрагмента  $T$  на изображении  $B_i'$ . Если смещения, найденные при прямом и обратном поиске, отличаются не более чем на 1 пиксель, то отождествление фрагментов  $T$  и  $T'$  считаем достоверным.

Исследования показали, что с использованием предложенных решений доля ложных сопоставлений уменьшается и они носят случайный характер, а истинные координатные рассогласования обладают систематичностью. Поэтому для определения достоверных координатных рассогласований изображений  $B_i'$  и  $B_i$ , характеризуемых вектором  $\mathbf{r}_i = (\Delta x_i, \Delta y_i)$ , сформируем гистограмму распределения этого параметра  $G(\mathbf{r})$ . Откуда искомое координатное рассогласование  $\mathbf{r}_0$  определяется как  $\mathbf{r}_0 = \arg \text{med} G(\mathbf{r})$ .

К сожалению, временные затраты рассмотренного подхода достаточно велики и в отдельных случаях оператор быстрее находит одноименные точки, чем процедура автоматического поиска. Поэтому была исследована возможность поиска положения различных фрагментов в соответствующих им зонах поиска на отдельных ядрах CPU. Так как распределение характерных фрагментов неравномерно и зависит от сюжета изображения, соответствующие им зоны поиска могут нахо-

диться в различных частях опорного изображения. На практике это означает необходимость работы со значительно большим, по сравнению с обработкой одного фрагмента, объемом данных. При превышении объема кэш-памяти верхнего уровня возникают систематические кэш-про-махи, связанные с одновременными операциями доступа к различным участкам ОП. Вследствие конкурентного доступа к памяти ускорение за счет использования нескольких ядер системы несущественно, а значительное превышение объема рабочего набора данных над объемом кэша приводит к замедлению работы по сравнению с однопоточной реализацией.

Значительно более эффективным с точки зрения распараллеливания представляется метод поиска одноименных точек SURF, основанный на извлечении из сопоставляемых изображений  $B'$  и  $B_0$  компактных описаний характерных фрагментов – дескрипторов и дальнейшим их сопоставлении между собой.

В алгоритме SURF для обнаружения характерных точек осуществляется поиск не углов, а пятен (blobs), т.к. дескрипторы такого рода фрагментов удается сопоставить с большей степенью достоверности. Для нахождения характерных точек изображения  $B$  выполняется последовательность шагов:

Формирование матриц  $D_\tau = [d_\tau(x, y)]$ , где  $d_\tau(x, y)$  – определитель матрицы Гессе. Для вычисления вторых производных изображения  $B$  в точке  $(x, y)$  применяется бинаризованная аппроксимация фильтра Лапласиана гауссиана с размером окна фильтра  $\tau$ ,  $\tau = \{9, 15, 21, 27\}$  [4]. Локальные экстремумы функции  $d_\tau(x, y)$  соответствуют точкам максимального изменения яркости – пятнам и углам с размером, определяемым параметром  $\tau$ .

Определение координат характерных точек. Точка с координатами  $(x, y)$  является характерной точкой изображения  $B$ , если  $d_\tau(x, y)$  является локальным максимумом в окне  $3 \times 3 \times 3$ , т.е.  $d_\tau(x, y)$  больше гессиан соседних пикселей, построенных с размером окна фильтра  $\{\tau - 6, \tau, \tau + 6\}$ .

Субпиксельное уточнение положений характерных точек путем интерполяции найденных гессиан.

Для построения дескрипторов характерных точек для каждой точки выполняются следующие действия:

Определение ориентации дескриптора. Для этого с использованием фильтра Хаара вычисляются точечные градиенты в окрестности радиусом 6 отсчетов. Направление дескриптора формируется путем усреднения взвешенных значений вейвлета Хаара.

Вычисление дескриптора особой точки. Для вычисления дескриптора формируется прямоугольная окрестность характерной точки со стороной прямоугольника 40. Эта окрестность разбивается на 16 квадратов, в каждом из которых для всех точек в регулярной сетке  $5 \times 5$  с помощью фильтра Хаара вычисляется градиент. Дескриптор формируется из угла ориентации градиента, знака следа матрицы Гессе и четырех интегральных характеристик каждого квадрата – взвешенных сумм значений вейвлета Хаара по осям  $x$  и  $y$ , взвешенных сумм модулей этих значений. Вес определяется как значение гаус-

сиана с центром в особой точке. В соответствие с методикой авторов SURF, сформированные направления градиентов «поворачиваются» в соответствии с доминирующим направлением, что гарантирует инвариантность дескрипторов к повороту снимка.

Для определения одноименных точек согласно оригинальной методике выполняется сопоставление всех дескрипторов одного снимка с дескрипторами другого, причем мерой близости является Евклидово расстояние, рассчитываемое по всем компонентам дескриптора. Для ускорения операции сопоставления предлагается использовать знак следа матрицы Гессе (очевидно, что для светлых фрагментов на темном фоне он отрицателен и наоборот).

В ходе экспериментальных исследований установлено, что около 90 % времени на отождествление занимает сопоставление дескрипторов. Поэтому для сокращения временных затрат модифицируем алгоритм сопоставления дескрипторов.

Заметим, что в рамках решаемой задачи после трансформации в единую картографическую проекцию сопоставляемые снимки ориентированы в одном направлении и характеризуются схожим масштабом. Дескрипторы SURF, не нормированные в соответствии с доминирующим направлением, устойчивы к повороту до 15 градусов. В соответствии с этим предлагается для сопоставления множеств дескрипторов снимка  $Q'$  и опорного изображения  $Q$  следующий алгоритм.

Выделить непересекающиеся подмножества  $Q_\tau$ ,  $Q'_\tau$ ,  $\tau = \{9, 15, 21, 27\}$  так, чтобы дескрипторы каждого из подмножеств описывали фрагмент, являющийся характерным в масштабе, определяемом параметром  $\tau$ .

Выделить из каждого  $Q_\tau$ ,  $Q'_\tau$  пересекающиеся подмножества  $Q_{\tau\alpha_j}$ ,  $Q'_{\tau\alpha_j}$  такие, что все дескрипторы множеств  $Q_{\tau\alpha_j}$ ,  $Q'_{\tau\alpha_j}$  характеризуются углом доминирующего направления  $\alpha \in [a_j, a_{j+1} - \beta]$ , где параметр  $a_j$  определен рекурсивно,

$$a_j = 0, a_{j+1} = a_j + \delta; \tag{11}$$

величина  $\delta - \beta$  определяет размер диапазона пересечения.

Осуществить сопоставление дескрипторов всех соответствующих множеств  $Q_{\tau\alpha_j}$ ,  $Q'_{\tau\alpha_j}$ .

Однако наибольший прирост производительности дает параллельное вычисление компонент дескриптора. Для определения направления дескриптора и формирования его компонент необходимо вычислить 25 фильтров Хаара в 16 квадратах, что составляет 400 фильтров, в то время как фрагмент изображения размером 40x40 пикселей, необходимый для расчета дескриптора, занимает 1600 байт. С учетом малого размера блока данных целесообразно параллельно рассчитывать фильтры Хаара для  $n$  пикселей дескриптора, где число  $n$  определяется исходя из количества ядер системы и наличия технологий типа hyper-threading. При реализации на современном GPU все фильтры Хаара рассчитываются параллельно и с использованием быстродействующей разделяемой между потоками shared memory. Кроме того, в случае наличия большого числа ядер общего назначения, возможно параллельное вычисление нескольких дескрипторов без потери производительности (схема доступа к фрагментам снимка в памяти изображена на рис. 3).

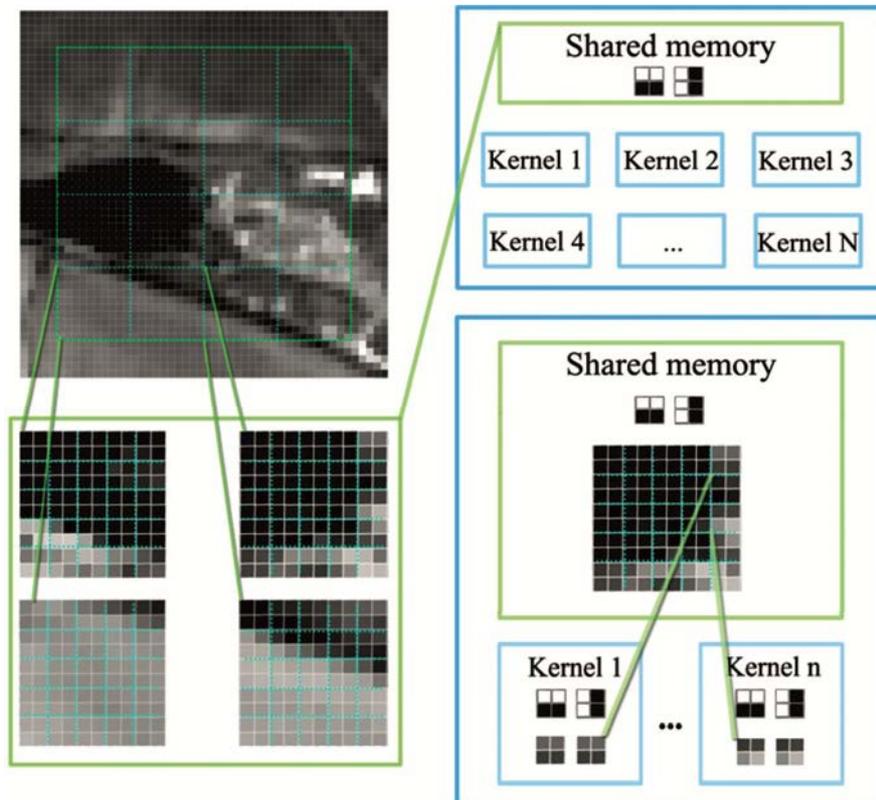


Рис. 3. Схема формирования дескриптора на GPU

Для сравнения, вычисление корреляционной функции двух фрагментов размером 128x128 пикселей без учета буфера на запись результатов корреляции требует по меньшей мере 32768 байт и не может быть эффективно реализовано с использованием shared-memory (стандартный размер которой составляет 16384 байт). Помимо этого, реализовано параллельное формирование матриц Гессе, собственно обнаружение характерных точек путем сопоставления с соседями. Так как в ходе этих операций обрабатывается значительный объем данных, используется скользящее окно небольшого размера, фрагменты внутри которого параллельно используются в нескольких потоках. В результате в зависимости от быстродействия оперативной памяти достигается 2-4 кратный прирост производительности относительно однопоточного варианта.

По итогам работы выполнена многопоточная реализация алгоритма поиска одноименных точек на базе SURF-дескрипторов на CPU (Intel Xeon 2.40GHz x 36) и GPU (NVIDIA Tesla K20c) с использованием примитивов библиотеки OpenCV (<http://opencv.org/>). Поиск одноименных точек на снимке размером 1920x985 пикселей и изображении размером 3840x3840 пикселей занимает 50 – 110 секунд для CPU реализации и до 4 секунд для GPU.

#### **Заключение**

Таким образом, по результатам проведенных исследований получены следующие результаты.

Создан банк опорной растровой информации на территорию РФ и страны СНГ. Растровое покрытие этой

территории организовано в виде пирамиды разномасштабных слоев с разбивкой на тайлы и занимает объем 300 Гб. Такое представление информации позволяет реализовать доступ к любому участку покрытия в режиме реального времени.

На базе алгоритма SURF разработан высокопроизводительный и надежный механизм идентификации координат одноименных объектов на опорном и анализируемом разновременных изображениях, имеющих текстурные различия и содержащих облачные объекты. Найденные координаты опорных точек и их высоты передаются в процедуру оценки точности геопривязки маршрутов съемки.

Созданная технология автоматического контроля геопривязки адаптирована к информации от КА «Канопус-В» и проходит в настоящее время отработку в Научном центре оперативного мониторинга Земли.

#### **Литература**

1. Chabita Devaraj, Chintan A. Automated geometric correction of multispectral images from High Resolution CCD Camera (HRCC) on-board CBERS-2 and CBERS-2B// ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 89.
2. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов, 2009, №3, С. 36-40.
3. Гонсалес Р., Вудс Р., Цифровая обработка изображений. – Техносфера, 2000, 1072с.
4. Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool, «Speeded Up Robust Features», ETH Zurich, Katholieke Universiteit Leuven.

### **ПРИГЛАШЕНИЕ**

*на XI Международную научную конференцию*

### **Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2015**

**12 – 14 ноября 2015 г. Владимир-Суздаль, Россия**

#### **ОРГАНИЗАТОРЫ:**

*Министерство образования и науки РФ, Российское НТО РЭС им. А.С. Попова, Международная академия связи, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Университет Фридриха Александра (Германия); Фраунгоферовский институт интегральных схем (Германия); Фирма National Instruments (США).*

#### **ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ:**

1. Технологии и сети инфокоммуникаций;
2. Методы обработки информации;
3. Помехозащищенность инфокоммуникационных систем;
4. Моделирование и автоматизированное проектирование инфокоммуникационных систем и устройств.
5. Системы и комплексы инфокоммуникаций;
6. Молодежная научная школа «Интеллектуальные системы и технологии передачи информации»;
7. Круглый стол: «Перспективы развития инфокоммуникаций».

#### **СПРАВКИ:**

Сайт: <http://ptmm.vlsu.ru>

Телефоны: (4922) 479-960; 479-739; Факс: (4922) 479-960

E-mail: [ptmm@vlsu.ru](mailto:ptmm@vlsu.ru)

Адрес: ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, г. Владимир, 600000.