

**А.В. Козловский**

### **РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СОСТАВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Рассмотрены вопросы организации параллельной обработки информации при решении задач прикладной фотограмметрии, а именно формирования изображений высокого разрешения. В статье представлен новый метод обработки информации при формировании изображений высокого разрешения (HR) для решения задач прикладной фотограмметрии, основанные на адаптивной сшивке подкадров на основе совмещения ключевых точек и анализа контуров с использованием опорного изображения низкого разрешения (LR) в виде шаблона и реализующий его модифицированный алгоритм. Одной из особенностей метода является распараллеливание процесса обработки информации, что достигается за счет работы в группе мобильных объектов. Новизна метода заключается в комбинации следующих ключевых компонентов: использование опорного LR-изображения как шаблона лежит в основе распараллеливания процессов обработки информации, и позволяет организовать совместную работу участников процесса по единым правилам, а также минимизировать глобальные ошибки сшивки кадров; применение комплексного алгоритма совмещения подкадров по ключевым точкам для сшивки изображения высокого разрешения по LR-шаблону позволяет значительно повысить детализацию и точность восстановления изображения за счет корреляции множества кадров высокого разрешения от устройств группы, а также компенсировать геометрические искажения, шумы и артефакты; интеграция различных вычислительных оптимизаций и алгоритмов анализа контуров для коррекции локальных искажений сшивки подкадров позволяет устранить люфт при совмещении точных частичных изображений на опорном LR-изображении. Экспериментальные результаты демонстрируют повышение точности сшивки на 25% ( $SSIM = 0.92$ ) и снижение времени обработки на 40% по сравнению с традиционными методами. Метод адаптирован для применения на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, включая распределенные системы на базе мобильных платформ, а также допускает оптимизацию на основе распараллеливания в группе мобильных устройств (мобильных объектов, МО).*

*Распараллеливание обработки информации; мобильные объекты; формирование изображений; дескрипторы; анализа контуров.*

**A.V. Kozlovskiy**

### **PARALLELIZATION OF INFORMATION PROCESSING IN THE FORMATION OF COMPOSITE IMAGES**

*This paper considers the issues of organization of parallel information processing when solving problems of applied photogrammetry, namely the formation of high-resolution images. The article presents a new information processing method for obtaining high-resolution (HR) image formation for applied photogrammetry tasks based on adaptive stitching of subframes on the basis of key point matching and contour analysis using a low-resolution (LR) reference image as a template. One of the features of the method is parallelization of information processing, which is achieved by working in a group of mobile objects. The novelty of the method lies in the combination of the following key components: the use of the reference LR-image as a template is the basis for parallelization of information processing processes, and allows to organize joint work of the process participants according to common rules, as well as to minimize the global errors of frame stitching; the use of a complex algorithm of subframe matching by key points for stitching the high-resolution image by LR-template allows to significantly increase the detail and accuracy of image reconstruction due to the coefficient of error of the image stitching. Experimental results demonstrate a 25% improvement in stitching accuracy ( $SSIM = 0.92$ ) and a 40% reduction in processing time compared to traditional methods. The method is adapted for application on devices with limited computational resources, including distributed systems based on mobile platforms, and allows parallelization-based optimization in a group of mobile devices (mobile objects, MOs).*

*Parallelization of information processing; mobile objects; image generation; descriptors; contour analysis.*

**Введение.** Современные задачи фотограмметрии, такие как анализ и подсчет объектов на изображениях, 3D-реконструкция, мониторинг объектов и картография, требуют выполнения процессов обработки изображений высокого разрешения. Примерами могут служить задачи промышленности: подсчет числа объектов, определение их класса, прокладка маршрутов в картографии, дефектоскопия конструкций и сооружений, анализ производственных линий, проводов и трубопроводов и так далее.

Проблема заключается в повсеместном применении классических методов, включая восстановление структуры объектов в процессе движения (SfM) и одновременную локализацию и картографирование (SLAM). При этом применение классических средств съемки и обработки изображений бывает затруднено и их пытаются заменить на мало-мощные мобильные объекты или вообще на процесс классической съемки при помощи смартфонов.

Авторы работы [1] предложили алгоритм, позволяющий устранять размытие и слабую освещенность на снимках, полученных с помощью камеры мобильного телефона, однако он основан на использовании статистических параметров, что не позволяет эффективно справляться с артефактами движения и может привести к искажению мелких деталей. Также этот подход, хоть и снижает шум в общем, но не учитывает нелинейные шумовые модели мобильных сенсоров, особенно в ситуации с высокой дисперсией пикселей. Кроме того, в статье предложен последовательный подход к обработке кадров, хотя отдельные статистические алгоритмы могут быть распараллелены, но это вызывает высокую нагрузку на мобильные процессоры.

В свою очередь, в статье [2] предложен нейросетевой GAN-ориентированный алгоритм, позволяющий комплексно повышать качество снимка до уровня цифровых зеркальных камер с использованием слабого надзора (на несоответствующих парах данных). Здесь также имеются некоторые недостатки в контексте решаемой задачи. Например, использование GAN может приводить к появлению «фантомных» текстур или артефактов в областях с низкой информативностью (тени или неоднородные поверхности), а также к искажению локальных контрастов или цветовых переходов в сценах с высокой динамикой. GAN-подход часто добавляет лишние детали, интерпретируя шум как структуры, имеющие значения. Кроме того, GAN-архитектуры требуют значительных вычислительных ресурсов для инференса, что неприменимо для мобильных устройств и использования в реальном времени.

Повышению качества снимков высокого разрешения посвящена работа [3], в которой предлагается подход мозаичного смешения снимков, сделанных устройствами различного типа. В контексте решаемой задачи, совмещение изображений с бортовых камер и аэрофотоснимков с различным ракурсом приводит к появлению геометрических артефактов из-за различных углов обзора и разрешений камер, а наличие движущихся объектов создает конфликты данных, фантомные объекты и размытия, которые никак не обрабатываются в предложенном подходе. Кроме того, алгоритм изначально последовательный и не подразумевает распараллеливания на высоком уровне.

Обработка и улучшение снимков любого вида рассматривается авторами в работе [4], в которой предлагается алгоритм повышения разрешения гиперспектрального изображения, основанный на спектральном не смешивании, для слияния многоспектрального изображения с высоким пространственным разрешением и изображения с низким пространственным разрешением. Однако, точность представленного метода сильно зависит от корректности оценки спектральных компонент и их пространственного распределения, нелинейные эффекты непременно приводят к спектральным искажениям и артефактам. Кроме того, алгоритм требует решения задач оптимизации для спектрального размешивания и пространственной реконструкции, что делает его ресурсоемким.

Известны также работы, посвященные вопросам повышения отдельных свойств снимка: разрешение, экспозиция, резкость и размытие и пр. за счет совмещения снимков с имеющимися в базе данных и вычисления на основе полученного совмещения нового изображения [5].

В отличие от методов, направленных на обработку готового снимка, в работе [6] рассматривается метод, позволяющий пользователю за счет интерактивных подсказок по управлению камерой получить более качественный снимок. Однако такой метод может быть применим для системы, где участвует «человек-оператор», но не для систем с автоматизацией процессов.

Проведенный анализ показал, что существующие решения направлены на увеличение разрешения фотоснимка без потери качества и улучшение изображения, представленного на фотоснимке (повышение детализации и улучшение восприятия) за счет применения сложных и последовательных алгоритмов, которые зачастую не применимы на мобильных устройствах или требуют комбинированных архитектур, включающих мощные вычислительные устройства, что нереально для систем с автоматизацией, проблемами со связью и приближением к реальному времени.

В работе [7] предложен подход к получению снимков высокого разрешения с помощью камеры мобильного телефона. Основным отличием предложенного подхода от известных алгоритмов панорамной съемки является использование слоев-масок, получаемых из снимка общего плана измеряемого объекта. Слои-маски позволяют точнее позиционировать телефон, сохраняя не только крайние точки фотографий частей объекта при их склеивании, но также и пропорции объекта, что позволяет избежать известных искажений, присущих панорамным снимкам.

Также автор принимал участие в более детальной проработке метода фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантного к фоторегистрирующим устройствам [8]. Предложена методика подготовки исходных данных, в которой предлагается способ повышения разрешения изображений для прикладной фотограмметрии, основанный на адаптивной сшивке подкадров с использованием LR-шаблона на основе сетки, подготавливаемой с помощью человека-оператора.

Эти идеи развиты автором в ходе исследований и экспериментов. В частности, предложенный в данной статье метод формирования изображений высокого разрешения и модифицированный алгоритм, его реализующий, отличается от предыдущих следующим: использованием адаптивной сшивкой с LR-шаблоном, распараллеливанием на группе мобильных устройств, а также комбинацией процедур обработки контуров и ключевых точек подкадров, что делает его более подходящим для мобильных решений с жесткими требованиями к точности, качеству и скорости обработки информации.

**Постановка задачи.** В ходе анализа источников было установлено, что существующие методы обычно обладают двумя существенными ограничениями:

1) **накопление ошибок** при последовательной сшивке кадров – это приводит к дрейфу координат, особенно при работе в динамически изменяющихся условиях окружающей среды;

2) **высокие вычислительные затраты или недоступность распараллеливания:** это выражается в том, что алгоритмы, основанные на глубоком обучении, статистике или глобальной оптимизации, требуют значительных ресурсов памяти и процессорной мощности и, как правило, выполняются на одном мощном устройстве или удаленно в «облаке».

Соответственно, актуальной задачей является разработка метода, лишенного указанных недостатков и допускающего возможность применения в промышленных сценариях.

**Математическая модель для реализации метода.** Разработанный метод должен устранять указанные проблемы за счет следующих факторов:

- ◆ реализации первичного формирования опорного изображения низкого разрешения (LR), служащего геометрическим каркасом для подкадров изображения высокого разрешения (HR) и морфологией для размещения сшиваемых подкадров в пространстве LR;

- ◆ адаптивного сопоставления ключевых точек между подкадрами и сегментами LR-изображения с применением фильтрации и анализа контуров;

- ◆ перехода от последовательной обработки подкадров к параллельной, позволяющей разделить вычислительную нагрузку между мобильными объектами.

Актуальность предложенного метода подтверждается его применимостью в промышленных сценариях, поэтому далее рассмотрим формальную математическую модель предложенного метода, позволяющую описать структуру метода и последовательность обра-

ботки информации, которая включает в себя формирование опорного LR-изображения, детекцию ключевых точек и дескрипторов, сопоставление HR-кадров, процедуру распараллеливания и распределенной обработки информации.

**Формирование опорного LR-изображения.** Опорное изображение низкого разрешения  $I_{LR}$  формируется путем получения исходного кадра и понижения разрешения или путем усреднения  $N$  исходных кадров  $\{I_1, I_2, \dots, I_N\}$  как

$$I_{LR}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(x, y) + \epsilon(x, y),$$

где  $\epsilon(x, y) = G(x, y, \sigma) * I_i$  – гауссова фильтрация с ядром  $\sigma = 1.5$ . Данный подход снижает шум и артефакты движения малой амплитуды (смещение объектов между кадрами), обеспечивая стабильное изображение для последующей обработки. В результате такого подхода формируется стабильная основа – опорное изображение для последующей реализации предложенного метода. В общем случае это матрица  $I$  с размерами  $H \times W$ , где  $H$  – это высота изображения, а  $W$  – это его ширина, т.е. имеется возможность создавать опорное изображение как матрицу подкадров. Таким образом, для исходной матрицы изображения  $I$  и его точек  $I(i, j) \exists i, i \in [1, H] \cap \exists j, j \in [1, W]$ , существует часть  $I_{crop} = I(x_1: x_2, y_1: y_2)$ , определяемая верхним левым углом с координатами  $(x_1, y_1)$  и нижним правым углом  $(x_2, y_2)$  с пределами  $1 \leq x_1 \leq x_2 \leq H \cap 1 \leq y_1 \leq y_2 \leq W$ , где  $I_{crop}$  будет иметь размеры  $(x_2 - x_1 + 1) \times (y_2 - y_1 + 1)$ . В этом случае задача сопоставления подкадров заключается в виде покрытия целевой области  $TM$ , представляемой в виде матрицы

$$TM = \begin{bmatrix} m_{1,1} & \dots & m_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ m_{m,1} & \dots & m_{m,n} \end{bmatrix},$$

где каждая точка или ячейка должна быть заснята мобильным объектом в определенной последовательности [7, 8].

В этом случае, фокус снимающего мобильного объекта или смартфона пользователя направлен на определенный центр подкадра, что является ключевым моментом для формирования последующего итеративного алгоритма обработки подкадров.

**Детекция ключевых точек и дескрипторов.** Для выделения ключевых точек в  $I_{LR}$  в предложенном методе применяется модифицированный алгоритм SIFT [9–11], состоящий из следующих шагов:

а) построение масштабного пространства

$$L(x, y, \sigma_k) = G(x, y, \sigma_k) * I_{LR}, \quad \sigma_k = \sigma_0 * 2^{\frac{k}{S}},$$

где  $\sigma_0 = 1.6$ ,  $S = 3$  – это число масштабов на октаву,  $k$  – коэффициент, увеличивающий величину  $\sigma$  для размытия.

б) поиск экстремумов в DoG (Difference of Gaussians)

$$DoG(x, y, \sigma_k) = L(x, y, \sigma_{k+1}) - L(x, y, \sigma_k),$$

где, по сути, DoG приближает лапласиан Гаусса (LoG), который используется для детектирования углов и точек интереса, но более эффективен с точки зрения вычислений, что очень важно в предложенном процессе обработки изображений;

в) расчет дескрипторов за счет формирования 128-мерного вектора для кодирования гистограммы градиентов, например, в 4x4 субрегионах (по числу подкадров в матрице  $LR$ ).

**Сопоставление кадров HR.** Для каждой ключевой точки, найденной на изображении, нужно запустить алгоритм поиска совпадений. Примером может являться алгоритм лучшего совпадения первого (Nearest Neighbor), который идентифицирует ближайшего соседа по евклидовому расстоянию среди дескрипторов второго изображения [9–13]. То есть проводится расчет дистанции между двумя дескрипторами для первого  $D_1$  и второго  $D_2$  изображений:

$$dist(D_{1i}, D_{2j}) = \sqrt{\sum_k (D_{1ik} - D_{2jk})^2}.$$

Поэтому для каждого подкадра  $I_{HR}^j$  выполняется:

а) поиск соответствий, например при помощи минимизации функции ошибки через RANSAC (Random Sample Consensus), т.е. минимизация ошибки репроекции в задаче оценки параметров математической модели, в которой присутствуют выбросы (outliers):

$$H^* = \arg \min_H \sum_i \rho \left( \|p_i - H * q_i^j\|^2 \right),$$

где  $H \in R^{3 \times 3}$  – матрица гомографии, а  $\rho$  – функция потерь Хубера (Huber Loss), позволяющая оценить потери для каждого предсказанного значения  $\hat{y}$  и истинного значения  $y$

$$\text{как } H(y, \hat{y}) = \begin{cases} \frac{1}{2}(y - \hat{y})^2 & \text{если } |y - \hat{y}| \leq \delta \\ \delta * \left( |y - \hat{y}| - \frac{1}{2}\delta \right) & \text{если } |y - \hat{y}| > \delta \end{cases}, \text{ где } \delta \text{ – пороговый параметр, кото-}$$

рый определяет границу между квадратичным и линейным режимом, а  $|y - \hat{y}|$  – абсолютное значение ошибки (различия) между истинным и предсказанным значением. Также можно отметить, что функция потерь Хубера в первом случае ( $\leq \delta$ ) ведет себя как среднеквадратичная ошибка MSE, что обеспечивает быструю сходимость, так как градиенты для малых ошибок достаточно велики. Во втором случае, когда ошибка велика, функция приходит к линейному режиму, имитируя поведение средней абсолютной ошибки MAE, т.е. влияние больших ошибок (вбросов) ограничивается, повышая робастность этапа в целом;

б) коррекция контуров, при которой оператор Собеля помогает выделить границы объектов для нормализации шивки как:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I_{HR}^j, \quad G_y = G_x^T.$$

В этом случае смещение подкадра ( $\Delta x, \Delta y$ ) определяется через максимизацию корреляции контуров. Это корреляционная функция, вычисляемая как скалярное произведение нормализованных карт градиентов.

**Глобальная оптимизация процесса.** Оптимизация выполняется при помощи вычисления целевой функции, которая объединяет согласованность преобразований и сохранение градиентов следующим образом:

$$E = \alpha \sum_{i,j} \|H_i - H_j\|^2 + \beta \sum_k \|\nabla I_k - \nabla I_{LR}\|^2,$$

где  $\alpha = 0.7, \beta = 0.3$  – весовые коэффициенты. Оптимизацию предлагается выполнять методом Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt, LM). Метод LM, как итеративный алгоритм решения задач нелинейной оптимизации и нахождения минимума функции ошибки и гибрида методов оптимизации типа градиентного спуска и Ньютона-Гаусса [10, 13, 14].

**Распараллеливание обработки.** Так как в предложенном методе предлагается способ обработки информации достаточно большого объема и, по факту, изображений высокого разрешения, охватывающих большую область пространства, то можно логически развивать предложенную концепцию в плане распараллеливания процесса обработки информации. Автором был предложен вариант распараллеливания на группе мобильных устройств, не изменяя основную концепцию обработки информации. В этом случае общая архитектура системы обработки информации становится распределенной и ее можно реализовывать на практике как локально (в рамках группы мобильных объектов), так и в большем масштабе, с применением обработки или хранения информации в «облаке».

Согласно принятой модели изображения  $I$  и тому, что было сказано выше, оно проходит ряд трансформаций  $Tr$ :

♦ первичное преобразование – получение изображения  $\hat{I} = Tr(I)$ , где, чаще всего, в частотной области  $\hat{I}$  содержатся коэффициенты, которые можно квантовать и кодировать;

- ◆ квантование – уменьшение количества информации за счет удаления малозначимых коэффициентов через оператор квантования  $Q$ , т.е.  $\hat{I}_Q = Q(I)$ ;
- ◆ кодирование (обычно энтропийное типа Хаффмана или арифметического) – сегрегация коэффициентов на важные или малозначимые при помощи перемножения матриц, то есть  $\hat{I}_C = C(\hat{I}_Q)$ ;
- ◆ передача по каналу связи с определенной пропускной способностью  $B$  бит/с и уровнем шума и других помех, которые могут нарушить трансляцию или запросить повторную передачу, т.е.  $\hat{I}'_C = \hat{I}_C + \epsilon$ , где  $\epsilon$  – это уровень помех и искажений. В реальностях цифровой связи пока можем оставить на уровне нуля;
- ◆ декодирование и восстановление – как обратный процесс, только проводимый лидером столько раз, сколько членов группы участвует в процессе съемки. Кратко этот процесс в модели можно описать как последовательность трансформаций:  $\hat{I}'_Q = C^{-1}(\hat{I}'_C)$ ,  $\hat{I}' = Q^{-1}(\hat{I}'_Q)$ , и  $I' = T^{-1}(\hat{I}')$ .

В рамках предложенного варианта решения поставленной задачи происходят следующие процессы:

1. Инициализация процедуры выбора группы мобильных объектов на основании таких критериев как: характеристики камеры, расстояние до точки съемки, энергетический ресурс, вычислительные возможности.
2. Размещение лидирующего МО относительно точки съемки.
3. Размещение участников группы МО относительно лидирующего МО.
4. Формирование опорного изображения  $LR$  для передачи участникам группы.
5. Распределение информации, вычислительных и полетных заданий.
6. Выполнение процессов обработки информации на участниках группы МО.
7. Обратный обмен информацией и совмещение подкадров  $LR$  и  $HR$  на основании ключевых точек, дескрипторов, а также на основе анализа контуров [9, 10, 14–26].

Таким образом метод поддерживает распараллеливание на  $M$  устройствах следующим образом:

- а) устройство  $D_0$  генерирует  $I_{LR}$  и распределяет зоны и характеристики съемки;
- б) устройства синхронизируются за какое-то конечное время;
- в) каждое устройство  $D_i$  обрабатывает свой собственный подкадр  $I_{HR}^i$ , применяя локальную коррекцию яркости как

$$I_{adj}^i = a_i * I_{HR}^i + b_i, \quad a_i = \frac{\mu_{LR}}{\mu_i}, \quad b_i = \mu_{LR} - a_i \mu_i.$$

- г) центральный вычислительный узел решает СЛАУ типа  $J^T J \Delta H = -J^T r$  для финальной сборки, показанную выше.

**Экспериментальные результаты.** В общем случае, в ходе работы и экспериментальных исследований сформировался алгоритм, состоящий из следующих этапов:

1. Загрузка параметров алгоритма и начальных изображений. Используется матричное представление изображений в виде 9 на 9 сегментов панорамы для отладки или реальное изображение панорамы с мобильного устройства.
2. Подготовка изображения низкого разрешения или получение такового от ведущего мобильного объекта (опорного изображения). Для отладки используется ресайзинг или понижение разрешения математическими методами. В реальной ситуации используется изображение низкого разрешения, снятое мобильным агентом с большего расстояния чем изображения с агентов, формирующих составные изображения.
3. Получение результата съемки частей изображений от ведомых мобильных объектов как матрица изображений в памяти.
4. Выделение ключевых точек опорного изображения с использованием методов типа SIFT.
5. Выделение ключевых точек составных изображений теми же алгоритмами.
6. Для каждого составного изображения:
  - а. Совмещение точек составного изображения и опорного.

- б. Компенсация смещений и определение истинных координат.
  - с. Размещение кадра на результирующей матрице (изначально пустой).
7. Формирование конечной матрицы и вывод результата.  
Структурная схема модифицированного алгоритма приведена на рис. 1.

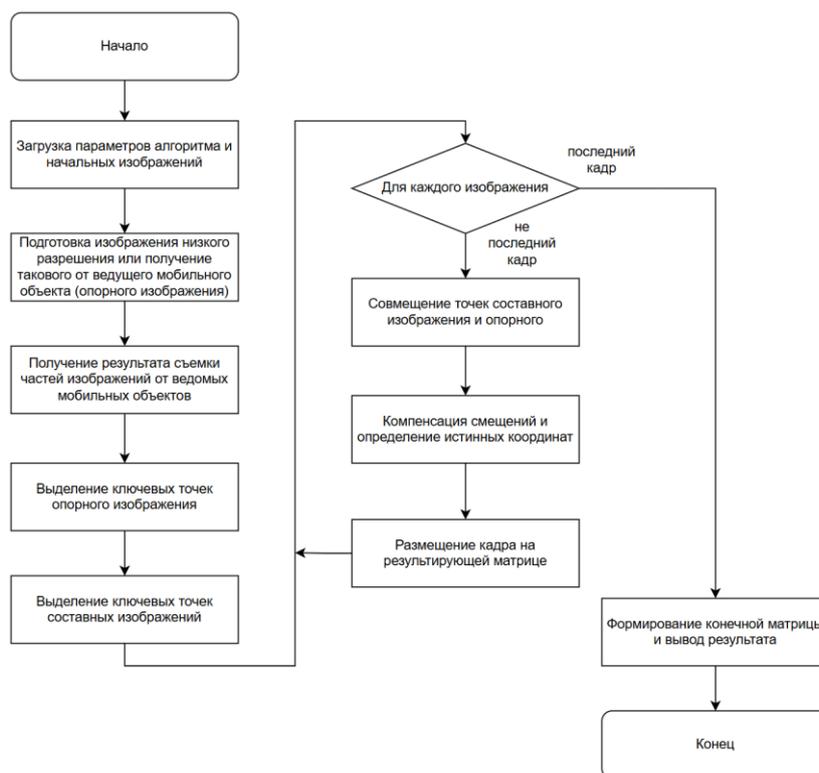


Рис. 1. Структурная схема модифицированного алгоритма обработки информации при формировании изображения высокого разрешения

Далее было разработано программное обеспечение и проведено экспериментальное исследование. В качестве исходного изображения были использованы фото на местности, снятые с мобильного устройства и с дрона с камерой (рис. 2).



Рис. 2. Исходное изображение низкого разрешения

Матрица составных изображений, распределенных на устройства, имела следующий вид (рис. 3).



Рис. 3. Матрица составных изображений, распределенных на устройства

Тогда «карта» распределения ключевых точек и дескрипторов для сшивки представлялась следующим образом (рис. 4).



Рис. 4. «Карта» распределения ключевых точек и дескрипторов для сшивки

Соответственно, в результате эксперимента, совмещенное изображение высокого разрешения, составленное по маске  $LR$  имело следующий вид (рис. 5).

В целом, тестирование проводилось на наборе более чем из 500 подобных изображений с разрешением 4К, полученных с дронов DJI Phantom 4 (камера 20 Мп) и смартфона типа Xiaomi Mi 11 (камера 108 Мп). В качестве координирующего звена и «источника» первичных параметров использовался микрокомпьютер Raspberry Pi 4 (4 ГБ ОЗУ).

Результаты экспериментов сведены в табл. 1.



Рис. 5. Совмещенное изображение высокого разрешения

Таблица 1

## Результаты экспериментов

Параметр	Предложенный метод	Градиентное сглаживание	Нейросетевой подход
SSIM (Structural Similarity Index)	0.92	0.73	0.88
PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio)	32.5	28.1	30.9
Время обработки (с/кадр)	0.8	1.5	2.3
Потребление памяти (МБ)	50	85	320

По результатам экспериментов предложенный метод позволил повысить точность (с SSIM > 0.9) за счет устранения артефактов на стыках подкадров, использования RANSAC и контурного анализа, производительность за счет использования нескольких устройств при распараллеливании обработки подкадров, энергоэффективность за счет снижения потребляемой памяти по сравнению с нейросетевыми подходами. Кроме того, поддержка распределенных архитектур для обработки в реальном времени является ключом к масштабированию систем, реализующих метод на практике.

**Заключение.** Таким образом, в работе предложены метод и модифицированный алгоритм обработки информации при формировании изображений высокого разрешения для решения задач прикладной фотограмметрии, основанные на адаптивной сшивке подкадров, полученных в группе МО на основе ключевых точек и анализа контуров с использованием опорного изображения низкого разрешения. Также предложено и апробировано расширение метода за счет распределения задач обработки информации на множество мобильных объектов с обратным восстановлением изображения за счет совмещения по ключевым точкам и сопоставления контуров.

*Экспериментальные результаты демонстрируют повышение точности сшивки на 25% (SSIM = 0.92) и снижение времени обработки на 40% по сравнению с традиционными методами. Метод адаптирован для устройств с ограниченными вычислительными ресурсами, включая распределенные системы на базе мобильных платформ, а также допускает оптимизацию на основе распараллеливания в группе мобильных устройств.*

Таким образом, предложенные метод и алгоритм сочетают высокую точность, низкие вычислительные затраты и возможность масштабирования. Предложенное решение имеет практическую значимость и предполагает внедрение в промышленности, сельском хозяйстве, использование в системах мониторинга и робототехники.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ratna Babu K. and Dr. K. V. N. Sunitha. A New Approach to Enhance Images of Mobile Phones with In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance // International Conference on Advances In Computer Engineering. – 2013.
2. Ignatov A., Kobyshev N., Timofte R., Vanhoey K., & Van Gool L. WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras // In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2018. – <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00112>.

3. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Idei, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima and Takashi Naito. Road Image Update using InVehicle Camera Images and Aerial Image // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (Iv) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011.
4. Mohamed Amine Bendoumi, Mingyi He, Shaohui Mei. Hyper Spectral Image Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral ImageBased on Spectral Unmixing // IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing. – 2011.
5. Zhang C., Gao J., Wang O., Georgel P., Yang R., Davis J., Pollefeys M. Personal photograph enhancement using internet photo collections // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2014. – 20 (2). – P. 262-275.
6. Xu Y., Ratcliff J., Scovell J., Speiginer G., & Azuma R. Real-time guidance camera interface to enhance photo aesthetic quality // In Conference on Human Factors in Computing Systems: Proceedings. – 2015. – Vol. 2015-April. – P. 1183-1186. Association for Computing Machinery. – <https://doi.org/10.1145/2702123.2702418>.
7. Самойлов А.Н., Кучерова М.С., Сергеев Н.Е. Подход к получению цифровых изображений высокого разрешения с помощью камеры мобильного устройства // Системный синтез и прикладная синергетика: Сб. научных работ IX Всероссийской научной конференции, Нижний Архыз, 24–27 сентября 2019 года. – Нижний Архыз, 2019. – С. 346-351.
8. Самойлов А.Н., Сергеев Н.Е., Волошин А.В., Козловский А.В. Метод фотограмметрического измерения геометрических параметров объектов, инвариантный к фоторегистрирующим устройствам // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. – 2021. – № 4 (291). – С. 58-69. – DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-58-69.
9. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60. – P. 91-100.
10. Brown M., Lowe D.G. Multi-Image Matching using Multi-Scale Oriented Patches // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 1. – P. 510-517.
11. Мельник Э.В., Самойлов А.Н., Козловский А.В., Волощук В.И. Применение мобильных устройств при решении задач прикладной фотограмметрии // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIX Всероссийской научно-практической конференции и XV молодежной школы-семинара. Таганрог, 01 апреля 2024 г. – Таганрог: ДиректСайнс (ИП Шкуркин Д.В.), 2024. – С. 459-462.
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. – 1981. – P. 726-740.
13. Zhou F. [et al.] Edge-Preserving Image Processing for Mobile Devices // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2018.
14. Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2007. – Vol. 2, No. 1. – P. 1-104.
15. Самойлов А.Н., Волошин А.В., Козловский А.В. Алгоритмическое обеспечение системы интеллектуальной обработки цифровых изображений для задач прикладной фотограмметрии // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 3 (246).
16. Беспалов Д.А., Поленов М.Ю., Иванов Д.А. Реализация геоинформационной системы на основе распределенной архитектуры обработки данных // Информатизация и связь. – 2021. – № 8. – С. 60-65.
17. Bepalov D., Polenov M., Ivanov D. Using a Distributed Architecture of a Geographic Information System to Support Thin Clients // Proceedings of 6th Computational Methods in Systems and software. – 2023. – Vol. 1. – P. 663-669.
18. Мельник Э.В., Сафроненкова И.Б. Предметно-ориентированная онтологическая модель распределенной системы мониторинга с мобильными компонентами на базе распределенного реестра // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023): Матер. мультиконференции. В 4-х т. Т. 2. Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2023. – С. 305-308.
19. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.П. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 605.
20. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid Algorithm of Mobile Position-Trajectory Control // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 8th Computer Science On-line Conference, Springer, Czech Republic, 2019. – Vol. 2. – P. 287-295.
21. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм управления роем гомогенных роботов в условиях ограниченного пространства // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 72-82.
22. Клименко А.Б., Мельник Я.Э. Исследование возможности применения концепции туманных вычислений и технологии распределенного реестра при построении информационно-управляющих систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 19-27.

23. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11.
24. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление роём роботов при исследовании некоторой территории методом силовой релаксации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 5 (207).
25. Капустян С.Г., Мельник Э.В. Системный анализ требований и оптимизация состава группы роботов в задаче мониторинга окружающей среды // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2024. – Т. 16, № 2. – С. 12-25. – DOI: 10.14529/mmph240202.
26. Таранов А.Ю., Мельник Э.В., Косьянчук В.В., Платошин Г.А. Коммуникация в реконфигурируемых информационно-управляющих системах критического назначения и перспективный способ ее обеспечения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2024. – № 4 (149). – С. 140-154.

## REFERENCES

1. Ratna Babu K. and Dr.K.V.N. Sunitha. A New Approach to Enhance Images of Mobile Phones with In-Built Digital Cameras Using Mean And Variance, *International Conference on Advances In Computer Engineering*, 2013.
2. Ignatov A., Kobyshev N., Timofte R., Vanhoey K., & Van Gool L. WESPE: Weakly supervised photo enhancer for digital cameras, *In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2018.00112>.
3. Masafumi Noda, Tomokazu Takahashi, Daisuke Deguchi, Ichiro Idei, Hiroshi Murase, Yoshiko Kojima and Takashi Naito. Road Image Update using InVehicle Camera Images and Aerial Image, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (Iv) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011*.
4. Mohamed Amine Bendoumi, Mingyi He, Shaohui Mei. Hyper Spectral Image Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral ImageBased on Spectral Unmixing, *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing*, 2011.
5. Zhang C., Gao J., Wang O., Georgel P., Yang R., Davis J., Pollefeys M. Personal photograph enhancement using internet photo collections, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2014, 20 (2), pp. 262-275.
6. Xu Y., Ratcliff J., Scovell J., Speiginer G., & Azuma R. Real-time guidance camera interface to enhance photo aesthetic quality, *In Conference on Human Factors in Computing Systems: Proceedings*, 2015, Vol. 2015-April, pp. 1183-1186. Association for Computing Machinery. Available at: <https://doi.org/10.1145/2702123.2702418>.
7. Samoylov A.N., Kucherova M.S., Sergeev N.E. Podkhod k polucheniyu tsifrovyykh izobrazheniy vysokogo razresheniya s pomoshch'yu kamery mobil'nogo ustroystva [An approach to obtaining high-resolution digital images using a mobile device camera], *Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika: Sb. nauchnykh rabot IX Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, Nizhniy Arkhyz, 24–27 sentyabrya 2019 goda* [System synthesis and applied synergetics: Collection of scientific papers of the IX All-Russian Scientific Conference, Nizhny Arkhyz, September 24-27, 2019]. Nizhniy Arkhyz, 2019, pp. 346-351.
8. Samoylov A.N., Sergeev N.E., Voloshin A.V., Kozlovskiy A.V. Metod fotogrammetricheskogo izmereniya geometricheskikh parametrov ob"ektov, invariantnyy k fotoregistriruyushchim ustroystvam [A method for photogrammetric measurement of geometric parameters of objects invariant to photo-registering devices], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adyghe State University. Series: Natural-mathematical and technical sciences], 2021, No. 4 (291), pp. 58-69. DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-58-69.
9. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 2004, Vol. 60, pp. 91-100.
10. Brown M., Lowe D.G. Multi-Image Matching using Multi-Scale Oriented Patches, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, Vol. 1, pp. 510-517.
11. Mel'nik E.V., Samoylov A.N., Kozlovskiy A.V., Voloshchuk V.I. Primenenie mobil'nykh ustroystv pri reshenii zadach prikladnoy fotogrammetrii [The use of mobile devices in solving applied photogrammetry problems], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XV molodezhnoy shkoly-seminara. Taganrog, 01 aprelya 2024 g* [Prospective systems and control tasks: Materials of the XIX All-Russian scientific-practical conference and XV youth school-seminar. Taganrog, April 1, 2024]. Taganrog: DirektSayns (IP Shkurkin D.V.), 2024, pp. 459-462.
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, 1981, pp. 726-740.
13. Zhou F. [et al.] Edge-Preserving Image Processing for Mobile Devices, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2018.
14. Szeliski R. Image Alignment and Stitching: A Tutorial, *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2007, Vol. 2, No. 1, pp. 1-104.

15. Samoylov A.N., Voloshin A.V., Kozlovskiy A.V. Algoritmicheskoe obespechenie sistemy intellektual'noy obrabotki tsifrovyykh izobrazheniy dlya zadach prikladnoy fotogrammetrii [Algorithmic support of the system for intelligent processing of digital images for applied photogrammetry tasks], *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Adyge State University. Series 4: Natural-mathematical and technical sciences], 2019, No. 3 (246).
16. Bepalov D.A., Polenov M.YU., Ivanov D.A. Realizatsiya geoinformatsionno sistemy na osnove raspredelenno arkhitektury obrabotki dannykh [Implementation of a geographic information system based on a distributed data processing architecture], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2021, No. 8, pp. 60-65.
17. Bepalov D., Polenov M., Ivanov D. Using a Distributed Architecture of a Geographic Information System to Support Thin Clients, *Proceedings of 6th Computational Methods in Systems and software*, 2023, Vol. 1, pp. 663-669.
18. Mel'nik E.V., Safronenkova I.B. Predmetno-orientirovannaya ontologicheskaya model' raspredelennoy sistemy monitoringa s mobil'nymi komponentami na baze raspredelenno reestra [Domain-oriented ontological model of a distributed monitoring system with mobile components based on a distributed registry], *XVI Vserossiyskaya mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2023): Mater. mul'tikonferentsii* [XVI All-Russian Multiconference on Control Problems (MKPU-2023): Conference materials]. In 4ur t. Vol. 2. Volgograd, 11–15 September 2023. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2023 33. 305-308.
19. Kalyaev I.A., Kapustyan S.G., Gayduk A.R. Samoorganizuyushchiesya raspredelennye sistemy upravleniya gruppami intellektual'nykh robotov, postroennye na osnove setevoy modeli [Self-organizing distributed control systems for groups of intelligent robots based on a network model], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Control of large systems: collection of works], 2020, Vol. 30, No. 1, pp. 605.
20. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Hybrid Algorithm of Mobile Position-Trajectory Control, *Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 8th Computer Science Online Conference*, Springer, Czech Republic, 2019, Vol. 2, pp. 287-295.
21. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Gibridnyy algoritm upravleniya roem gomogennykh robotov v usloviyakh ogranichennogo prostranstva [Hybrid algorithm for controlling a swarm of homogeneous robots in a limited space], *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Transport], 2020, No. 2 (78), pp. 72-82.
22. Klimenko A.B., Mel'nik Ya.E. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya kontseptsii tumannykh vychisleniy i tekhnologii raspredelenno reestra pri postroenii informatsionno-upravlyayushchikh sistem [Study of the possibility of applying the concept of fog computing and distributed ledger technology in the construction of information and control systems], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical Sciences], 2021, No. 2, pp. 19-27.
23. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Upravlenie dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v kolonne [Control of the movement of a group of mobile robots in a column], *Nauchno-prakticheskii zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and Communication], 2021, No. 3, pp. 7-11.
24. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Upravlenie roem robotov pri issledovanii nekotoryy territorii metodom silovoy relaksatsii [Control of a robot swarm in the study of certain territories by the method of force relaxation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5 (207).
25. Kapustyan S.G., Mel'nik E.V. Sistemnyy analiz trebovaniy i optimizatsiya sostava gruppy robotov v zadache monitoringa okruzhayushchey sredy [System analysis of requirements and optimization of the composition of a robot group in the task of environmental monitoring], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics], 2024, Vol. 16, No. 2, pp. 12-25. DOI: 10.14529/mmph240202.
26. Taranov A.Yu., Mel'nik E.V., Kos'yanchuk V.V., Platoshin G.A. Kommunikatsiya v rekonfiguriruemyykh informatsionno-upravlyayushchikh sistemakh kriticheskogo naznacheniya i perspektivnyy sposob ee obespecheniya [Communication in reconfigurable critical information and control systems and a promising method for its provision], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Priborostroenie* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering], 2024, No. 4 (149), pp. 140-154.

**Козловский Александр Вячеславович** – Южный федеральный университет; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79888980779; кафедра вычислительной техники; старший преподаватель.

**Kozlovskiy Alexander Vyacheslavovich** – Southern Federal University; e-mail: kozlovskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79888980779; the Department of Computer Engineering; senior lecturer.