

# Формирование видеопанорамы по информации от разносектральных камер

И.А. Кудинов<sup>1</sup>, О.В. Павлов<sup>1</sup>, И.С. Холопов<sup>1,2</sup>, М.Ю. Храмов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный Рязанский приборный завод, Семинарская 32, Рязань, Россия, 390000

<sup>2</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет, Гагарина 59/1, Рязань, Россия, 390005

**Аннотация.** Рассмотрен алгоритм формирования видеопанорамы по информации от разносектральных камер распределенной оптико-электронной системы. Показано, распараллеливание вычислений с применением технологии CUDA позволяет реализовать функции улучшения видения (модифицированный алгоритм Multiscale Retinex) и комплексирования информации от разносектральных сенсоров (в том числе и в псевдоцветах) для двух независимо управляемых окон интереса размером 1024x768 пикселей с частотой не менее 30 Гц.

## 1. Введение

Автоматическое формирование в реальном времени видеопанорам высокого разрешения по информации от нескольких разнесенных камер с пересекающимися полями зрения является одним из актуальных направлений развития обзорных систем технического зрения. Навигация по изображению панорамы осуществляется с помощью управляемого пользователем окна интереса (ОИ). Такой подход является альтернативой обзорным системам с механическим приводом, поскольку обеспечивает одновременную работу нескольких пользователей с независимым выбором персональной области интереса без механического перемещения линий визирования камер. Другим преимуществом распределенных панорамных систем (РПС) является интеграция видеокамер в корпус/фюзеляж объекта носителя, что положительно сказывается на его аэродинамических характеристиках.

## 2. Способы формирования панорам

Существует два основных способа формирования панорам:

- подход, основанный на нахождении соответствия однородных координат пикселей на кадрах камер с номерами  $i$  и  $j$  путем выделения особых точек (ОТ), описания их окрестностей с использованием дескрипторов, автоматическом поиске пар соответствий и оценке по ним матрицы гомографии  $\mathbf{H}_{ij}$  [1, 2];
- подход, основанный на нахождении соответствия однородных координат пикселей путем предварительной калибровки камер РПС по тест-объекту, в том числе с применением вспомогательной широкоугольной камеры [3], если поля зрения смежных камер имеют малые угловые размеры зоны пересечения либо вовсе не пересекаются.

Преимуществом первого подхода к формированию панорамы является работоспособность даже при отсутствии априорных сведений о взаимном размещении камер РПС, преимуществом

второго – сохранение работоспособности в сложных условиях наблюдения и при малоконтрастных наблюдаемых сценах.

### 3. Совмещение разноспектральных изображений

Известно [4, 5], что одним из основных путей повышения ситуационной осведомленности в условиях плохой и недостаточной видимости является одновременное применение камер различных спектральных диапазонов (видимого телевизионного ТВ и инфракрасных ИК – ближнего NIR, коротковолнового SWIR, средневолнового MWIR и длинноволнового LWIR). Формирование панорамы из разноспектральных кадров по каждому из рассмотренных выше способов затрудняется различной физической природой формируемых ТВ и ИК камерами изображений: ТВ, NIR и SWIR камеры воспринимают отраженный объектом свет в диапазонах длин волн 0,38...0,76, 0,7...1,1 и 0,9...1,7 мкм соответственно; камеры MWIR и LWIR диапазонов – собственное тепловое излучение объекта на длинах волн 3...5 и 8...12 мкм соответственно. Поэтому для формирования видеопанорамы в РПС с разноспектральными камерами (в зависимости от выбранного способа склейки панорамы) требуется либо решение задачи поиска сюжетных соответствий на кадрах ТВ и ИК камер, либо изготовление универсального (имеющего высокую контрастность в рабочих диапазонах длин волн этих камер) шаблона для их взаимной калибровки.

#### 3.1. Поиск соответствий на разноспектральных изображениях

Анализ публикаций [5, 7-12] позволяет выделить четыре основных подхода к автоматическому совмещению разноспектральных изображений:

- на основе перехода в декоррелированное цветовое пространство и использования метода SIFT [6]: данный подход применим только для совмещения RGB кадров видимого диапазона и NIR [7];
- на основе взаимной морфологической корреляции предварительно сегментированных изображений [8, 9];
- по результатам контурного анализа [5, 10],
- по оценке матрицы гомографии путем ручного поиска соответствий [11, 12].

Ограничением к применению указанных методов являются ситуации, когда изображение в одном из видеоканалов (как правило, телевизионном) не позволяет выделить сюжетные элементы для поиска соответствий (например, при освещенности, близкой к нулевой, а также в плотном дыме или тумане). Решение задачи совмещения в таком случае может быть достигнуто путем механической юстировки, заключающейся в обеспечении параллельности линий визирования и одинаковых угловых размеров полей зрения камер каждого спектрального диапазона, а также их взаимного размещения, минимизирующего параллакс [13], однако данный подход не применим для РПС.

#### 3.2. Калибровка разноспектральных камер по универсальному шаблону

Калибровка камер РПС по тест-объекту является наиболее универсальным подходом для совмещения изображений в дальней зоне, но требует применения тестового шаблона, контрастного сразу в нескольких диапазонах спектра. Примеры таких шаблонов, формирующих типовое изображение «шахматная доска», рассмотрены в [14]. Результаты калибровки позволяют оценить матрицы внутренних и внешних параметров камер.

### 4. Алгоритм формирования видеопанорамы по информации от разноспектральных камер

Поскольку для изображений камер РПС характерны геометрические искажения, вызванные различными ракурсами съемки, то для минимизации последних в [15] показана целесообразность формирования панорамного кадра на виртуальной поверхности равномерной кривизны: сферы или цилиндра единичного радиуса. Реализованный авторами алгоритм заполнения ОИ, перемещающегося по сферической видеопанораме [16], для РПС с разноспектральными предварительно откалиброванными камерами содержит следующие этапы.

1. Инициализация: вычисление кватернионов  $\mathbf{q}_{iv0}$ , задающих начальные угловые направления на пиксели ОИ. При необходимости динамического изменения поля зрения ОИ перерасчет кватернионов  $\mathbf{q}_{iv0}$  выполняется в теле основного цикла.

Основной цикл

2. Оценка текущего углового положения опорной камеры РПС по тангажу  $\theta$  и крену  $\varphi$  и соответствующей данным углам матрицы поворота:

$$\mathbf{R}_{\varphi\theta} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

3. Вычисление кватерниона поворота для заданного углового положения линии визирования (центра ОИ)  $\mathbf{q}_{виз}$  и кватернионов  $\mathbf{q}_{iv}$ , определяющих текущее угловое положение пикселей ОИ:

$$\mathbf{q}_{iv} = \mathbf{q}_{виз}\mathbf{q}_{iv0}. \quad (2)$$

4. Заполнение ОИ для каждого спектрального диапазона пикселями с камер путем репроекции точек с поверхности виртуальной сферы единичного радиуса на их матрицы (при репроекции учитываются оцененные на этапе предварительной калибровки коэффициенты дисторсии объективов [17]).

5. Выполнение процедуры блендинга [1, 18] для ОИ каждого спектрального диапазона.

6. Попиксельное объединение информации от различных спектральных каналов в соответствии с выбранным алгоритмом комплексирования [19].

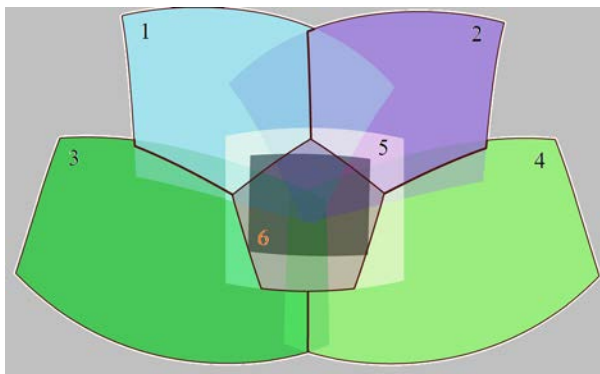
Поскольку для каждого пикселя ОИ обработка по приведенному алгоритму является однородной, это позволяет применить процедуру распараллеливания вычислений, например, с использованием ресурсов GPU.

## 5. Описание макета РПС

Макет РПС является развитием работы авторов [16] и помимо монохромных ТВ камер содержит тепловизор LWIR диапазона с полем зрения  $50^\circ \times 40^\circ$  (рисунок 1). Взаимное угловое положение полей зрения ТВ камер и тепловизора в секторе  $200^\circ \times 120^\circ$  приведено на рисунке 2.



**Рисунок 1.** Камеры макета РПС: LWIR (снизу по центру) и пять ТВ.



**Рисунок 2.** Пересечение полей зрения камер.

Для согласования кадров во времени на все камеры подаются внешние синхроимпульсы.

Для формирования ОИ вычисления разделены на параллельно выполняемые блоки (64 по горизонтали и 48 – по вертикали) по 256 нитей в каждом (16 нитей по горизонтали и 16 – по вертикали) с применением технологии CUDA и языка CUDA C. Поскольку копирование содержимого памяти CPU в память GPU и обратно является сравнительно медленным, то при реализации видеопанорамы количество таких операций минимизировано.



**Рисунок 3.** Иллюстрация к процедуре блендинга (условия наблюдения – облачность, 3х оптический зум): слева – исходный кадр в ОИ, справа – после блендинга.



**Рисунок 4.** Иллюстрация к результатам работы модифицированного алгоритма Multiscale Retinex (условия наблюдения – солнечный день): слева – исходный кадр, справа – после контрастирования.

В макете реализованы:

- управление угловым положением линии визирования оператора: по данным от системы позиционирования либо (при ее отсутствии) от джойстика;
- независимое отображение двух ОИ с динамическим изменением угловых размеров поля зрения от  $80^\circ \times 60^\circ$  до  $10^\circ \times 7,5^\circ$ ;
- блендинг (рисунок 3) по алгоритму [18];
- повышение контрастности ТВ изображения (рисунок 4) по модифицированному алгоритму Multiscale Retinex [20]: с целью ускорения вычислений для оценки яркости фона вместо сглаживания гауссовским фильтром по аналогии с [21] применяется равновесный Вох-фильтр;
- выбор режима отображения информации в ОИ: телевизионное, тепловизионное, псевдоцветное тепловизионное (реализованы карты цветов *Jet* [22] и *Cold-to-Warm* [23]), контрастированное телевизионное, комплексированное (реализовано объединение информации с формированием полутонового результата по [24] и в псевдоцветах – по алгоритмам из работ [25] и [26]); результаты комплексирования по алгоритму [24] приведены на рисунке 5.
- отображение взаимного углового положения ОИ первого и второго операторов.

Поскольку макет в настоящий момент содержит единственный тепловизор, то режим комплексирования информации от ТВ и ИК видеоканалов реализуется только при угловых положениях ОИ, содержащих часть области 6 (см. рисунок 2). В противном случае пользователю в данном режиме выводится информация только от ТВ камер. Это иллюстрирует рисунок 5, где в режимах отображения данных с ИК камеры и комплексирования нижние строки ОИ заполняются информацией от ТВ камер, поскольку при текущем положении линии визирования их угловые координаты не попадают в поле зрения тепловизора, и, следовательно, не содержат данных в LWIR диапазоне.



**Рисунок 5.** Результаты работы алгоритма комплексирования [24] (условия наблюдения – мелкий дождь, сумерки): слева – ИК кадр, по центру – ТВ кадр, справа – кадр в режиме комплексирования.

На GPU NVIDIA GeForce GTX 560 Ti (384 ядра) при максимальном объеме вычислений (блендинг, комплексирование в псевдоцветах контрастированного ТВ и ИК каналов) и размере ОИ 1024×768 пикселей для каждого из двух операторов обеспечивается темп обновления информации 32 Гц. Быстродействие для других режимов работы приведено в таблице, где для сравнения также приведены сведения о скорости обработки при реализации видеопанорамы на CPU Intel Core i5. Все значения в таблице округлены до целых в меньшую сторону.

**Таблица 1.** Предельный темп обновления информации в ОИ для двух пользователей РПС в различных режимах работы, Гц.

|            | <b>Режим 1:</b><br>ТВ панорама<br>без блендинга | <b>Режим 2:</b><br>ТВ панорама<br>с блендингом | <b>Режим 3:</b><br>режим 2 + Multiscale<br>Retinex | <b>Режим 4:</b><br>режим 3 +<br>комплексирование<br>с ИК-каналом по [24] |
|------------|---|--|--|--|
| <b>GPU</b> | 77  | 39   | 35   | 34   |
| <b>CPU</b> | 4   | 2  | 2  | 2  |

Таким образом, применение параллельных вычислений при формировании ОИ в РПС позволяет повысить скорость обработки в среднем в 16 раз.

## 6. Заключение

Реализованный с применением технологии CUDA алгоритм формирования видеопанорамы по информации от разноспектральных камер для двух окон интереса разрешением 0,7 Мп реализует с частотой не менее 30 кадров/с независимое отображение видеoinформации и функции улучшения видения: выравнивание яркости и комплексирование.

## 7. Литература

- [1] Brown, M. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features / M. Brown, D. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2007. – Vol. 74(1). – P. 59–73. DOI: 10.1007/s11263-006-0002-3.
- [2] Fischler, M. Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography / M. Fischler, R. Bolles // Communications of the ACM. – 1981. – Vol. 24(6). – P. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692.
- [3] Широков, Р.И. Увеличение углов поля зрения составной веб-камеры методом склеивания изображений / Р.И. Широков, В.И. Алехнович // Электронный научно-технический журнал «Контенант». – 2014. – № 4. – С. 10–23.
- [4] Визильтер, Ю.В. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов // Механика, управление и информатика. – 2011. – № 6. – С. 11–44.
- [5] Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / под ред. Л.Н. Костяшкина и М.Б. Никифорова. – М.: Физматлит, 2016. – 234 с.

- [6] Lowe, D.G Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / D.J. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60(2). – P. 91–110. DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- [7] Brown, M. Multi-spectral SIFT for Scene Category Recognition / M. Brown, S. Susstrunk: Proc. of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'11). – Washington DC: IEEE Computer Society, 2011. – P. 177–184. DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995637.
- [8] Визильтер, Ю.В. Комплексирование многоспектральных изображений для систем улучшенного видения на основе методов диффузной морфологии / Ю.В. Визильтер, О.В. Выголов, С.Ю. Желтов, А.Ю. Рубис // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2016. – № 4. – С. 103–114. DOI: 10.7868/S0002338816040120.
- [9] Визильтер, Ю.В. Сравнение изображений по форме с использованием диффузной морфологии и диффузной корреляции / Ю.В. Визильтер, В.С. Горбацевич, А.Ю. Рубис, О.В. Выголов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 265–274. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-265-274.
- [10] Efimov, A.I. Image Superimposition Technique in Computer Vision Systems Using Contour Analysis Methods / A.I. Efimov, A.I. Novikov, V.A. Sablina: Proc. of 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO 2016). – Bar, Montenegro, 2016. – P. 132–137. DOI: 10.1109/MECO.2016.7525721.
- [11] Ефимов, А.И. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений / А.И. Ефимов, А.И. Новиков // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 258–265. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-258-265.
- [12] Bhosle, U. Multispectral panoramic mosaicing / U. Bhosle, S.D. Roy, S. Chaudhuri // Pattern Recognition Letters. – 2005. – Vol. 26(4). – P. 471–482. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.08.007.
- [13] Бондаренко, А.В. Аппаратно-программная реализация мультиспектральной видеосистемы / А.В. Бондаренко, М.А. Бондаренко, И.В. Докучаев, В.Н. Дрынкин, С.М. Князев, Г.А. Набоков, К.Ю. Павлов, В.А. Ядчук // Техническое зрение в системах управления - 2017: тезисы докладов. – М.: ИКИ РАН, 2017. – С. 25–26.
- [14] St-Laurent, L. Passive Calibration Board for Alignment of VIS-NIR, SWIR and LWIR Images // L. St-Laurent, M. Mikhnevich, A. Bubel, D. Prévost // Quantitative InfraRed Thermography Journal. – 2017. – Vol. 14(2). – P. 193–205. DOI: 10.1080/17686733.2017.1319529.
- [15] Szeliski, R. Image Alignment and Stitching: a Tutorial / R. Szeliski // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2006. – Vol. 2(1). – P. 1–104. DOI: 10.1561/0600000009.
- [16] Кудинов, И.А. Алгоритм формирования видеопанорамы и его программная реализация с применением технологии CUDA / И.А. Кудинов, О.В. Павлов, И.С. Холопов, М.Ю. Храмов // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017): сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. – Самара, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2017. – С. 1580–1586.
- [17] Brown, D.C. Close-Range Camera Calibration / D.C. Brown // Photogrammetric Engineering. – 1971. – Vol. 37(8). – P. 855–866. DOI: 10.1.1.14.6358.
- [18] Burt, P. A Multiresolution Spline with Application to Image Mosaics // P. Burt, E. Adelson // ACM Transactions on Graphics. – 1983. – Vol. 2(4). – P. 217–236. DOI: 10.1145/245.247.
- [19] Li, S. Pixel-level Image Fusion: a Survey of the State of the Art / S. Li, X. Kang, L. Fang, J. Hu, H. Yin // Information Fusion. – 2017. – Vol. 33. – P. 100–112. DOI: 10.1016/j.inffus.2016.05.004.
- [20] Jobson, D.J. A Multiscale Retinex for Bridging the Gap between Color Images and the Human Observation of Scenes / D.J. Jobson, Z. Rahman, G.A. Woodell // IEEE Trans. on Image Processing. – 1997. – Vol. 6(7). – P. 965–976. DOI: 10.1109/83.597272.
- [21] Муратов, Е.Р. Алгоритм выравнивания освещённости объектов на изображениях с поточным выполнением / Е.Р. Муратов, Д.И. Устюков // Техническое зрение в системах управления - 2017: тезисы докладов. – М.: ИКИ РАН, 2017. – С. 29–31.
- [22] MATLAB Jet Array [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/jet.html> (11.10.2017).

- [23] Moreland, K. Diverging Color Maps for Scientific Visualization (Expanded) / K. Moreland: Proc. of 5<sup>th</sup> International Symposium of Advances in Visual Computing (ISVC-2009). Part II. – Las Vegas, 2009. – P. 92–103.
- [24] Пат. 2451338 РФ, МПК G06T5/00. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений / А.П. Богданов, Л.Н. Костяшкин, А.В. Морозов, О.В. Павлов, Ю.Н. Романов, А.В. Рязанов; заявитель и патентообладатель ОАО «Государственный Рязанский приборный завод». – № 2010152858/08; заявл. 23.12.2010; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.
- [25] Li, G. Fast color-transfer-based image fusion method for merging infrared and visible images / G. Li, S. Xu, X. Zhao // Proc. of the SPIE. – 2010. – Vol. 7710. – P. 77100S. DOI: 10.1117/12.849199.
- [26] Холопов, И.С. Реализация алгоритма формирования цветного изображения по сигналам монохромных видеодатчиков видимого и длинноволнового инфракрасного диапазонов в цветовом пространстве  $YCbCr$  / И.С. Холопов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 266–274. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-266-274.

# Real-time Multispectral Video Panorama Construction

I.A. Kudinov<sup>1</sup>, O.V. Pavlov<sup>1</sup>, I.S. Kholopov<sup>2</sup>, M.Yu. Khramov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Instrument-making Enterprise, Seminarskaya street 32, Ryazan, Russia, 390000

<sup>2</sup>Ryazan State Radio Engineering University, Gagarina street 59/1, Ryazan, Russia, 390005

**Abstract.** An algorithm for the video panorama construction from distributed multispectral cameras data is described. It is shown that operations of vision enhancement (modified Multiscale Retinex algorithm) and multispectral image fusion are implemented for two independently chosen regions of interest with a frame size of 1024x768 pixels and 30 fps using CUDA technology.

**Keywords:** multispectral camera calibration, panorama stitching, image fusion, CUDA.