

УДК 004.021

**Технология формирования панорамных разноспектральных
видеоизображений для обзорных авиационных
оптико-электронных систем**

Кудинов И.А.*, Холопов И.С., Храмов М.Ю.*****

*Государственный Рязанский приборный завод,
ул. Семинарская, 32; Рязань, 390000, Россия*

**e-mail: hunter@grpz.ryazan.ru*

***e-mail: kholopov.i.s@rsreu.ru*

****e-mail: hunter@grpz.ryazan.ru*

Аннотация

Рассмотрена технология формирования видеоизображения для области интереса пилота (оператора БПЛА) по информации от распределенных разноспектральных камер авиационной панорамной оптико-электронной системы. Приведен алгоритм формирования панорамного изображения по результатам предварительной фотограмметрической калибровки камер по специальному тест-объекту, робастный к условиям съёмки. Показано, что распараллеливание вычислений с применением технологии CUDA позволяет реализовать функции улучшения видения, в том числе с комплексированием информации от разноспектральных сенсоров, для двух независимо управляемых областей интереса размером от 1024×768 пикселей с частотой не менее 30 Гц. Приведены результаты полунатурных экспериментов по отображению видеоинформации в области интереса в соответствии с концепцией «прозрачной кабины».

Ключевые слова: сферическая панорама, область интереса, комплексирование изображений, блендинг, технология CUDA.

Введение

Автоматическое формирование видеопанорам высокого разрешения по информации от нескольких пространственно разнесенных камер с пересекающимися полями зрения является одним из актуальных направлений развития бортовых обзорных оптико-электронных систем (ОЭС). Навигация по панораме предполагает, как правило, наличие управляемой пользователем области интереса (ОИ) с задаваемыми коэффициентом электронного масштабирования и разрешением [1]. Такой подход является альтернативой применению обзорных оптико-механических систем, поскольку перемещающаяся по видеопанораме ОИ позволяет реализовать в авиационной и наземной технике концепцию так называемой прозрачной кабины [2, 3], а также одновременный независимый выбор персональных ОИ для нескольких членов экипажа без механического перемещения линий визирования камер ОЭС, что важно, например, при выполнении поисково-спасательных операций и пилотировании в сложных условиях (полет в ущелье, посадка вертолета на необорудованную площадку, заход на посадку при недостаточной видимости и др.). Применение в ОЭС панорамного типа (ОЭСПТ) камер различных спектральных диапазонов повышает ситуационную осведомленность в условиях плохой и недостаточной видимости [4-6].

В то же время для ОЭСПТ характерны оптический параллакс и различие в условиях экспонирования между камерами [7], что соответственно затрудняет

сшивку кадров с изображениями разноудаленных объектов и приводит к необходимости выполнять вычислительно ёмкое сглаживание перепадов яркости на границах объединяемых кадров – блендинг. Для ОЭСПТ с разноспектральными камерами [8] формирование панорамы дополнительно затрудняется различной физической природой изображений телевизионных (ТВ) и тепловизионных (ТПВ) камер: ТВ камеры и камеры ближнего и коротковолнового инфракрасных (ИК) диапазонов воспринимают отраженный объектом свет, а камеры средневолнового и длинноволнового ИК диапазонов – собственное тепловое излучение объекта. Поэтому для формирования видеопанорамы в ОЭСПТ с разноспектральными камерами требуется либо решение задачи поиска сюжетных соответствий на кадрах ТВ и ИК камер, либо их предварительная фотограмметрическая калибровка по универсальному (имеющему высокую контрастность и в видимом, и в ИК диапазонах длин волн) тест-объекту (ТО).

Постановка задачи

Формирование панорамного изображения по информации от N камер с пересекающимися полями зрения основано на нахождении соответствий между пиксельными координатами изображений с номерами i и j и определяется матрицей гомографии \mathbf{H}_{ij} размерности 3×3 [9]:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{H}_{ij}\mathbf{x}_j, \quad (1)$$

где матричное преобразование (1) выполняет пересчёт однородных координат пикселей изображения j -й камеры в систему координат (СК) i -й камеры, $\mathbf{x}_j = [u_j, v_j, 1]^T$ и $\mathbf{x}_i = [u_i, v_i, 1]^T$ – однородные пиксельные координаты i -го и j -го изображений, (u, v) – координаты пикселя на пересечении u -й строки и v -го столбца.

При отсутствии априорной информации оценка матрицы гомографии \mathbf{H}_{ij} быть основана на выделении m особых точек (ОТ), описании их окрестностей с использованием дескрипторов и автоматическом поиске пар соответствий ОТ (инлайеров) на кадрах i -й и j -й камер [10]. Платой за универсальность такого подхода является низкая эффективность поиска инлайеров на поверхностях с однородными текстурами (дорожное покрытие, трава, пашня, лес, водная гладь, небо), в сложных условиях наблюдения и при низком отношении сигнал-шум.

При наличии априорных сведений о взаимном положении СК камер, получаемых в ходе предварительной калибровки, матрица гомографии также может быть оценена по формуле:

$$\mathbf{H}_{ij} = \mathbf{K}_i[\mathbf{R}_{ij} - \mathbf{t}_{ij}\mathbf{n}^T/d]\mathbf{K}_j^{-1}, \quad (2)$$

где \mathbf{K}_i и \mathbf{K}_j – матрицы внутренних параметров, $i, j = 1..N$, \mathbf{R}_{ij} и \mathbf{t}_{ij} – соответственно матрица поворота и вектор параллельного переноса СК камеры j относительно i , d – длина перпендикуляра до плоскости съемки с нормалью \mathbf{n} относительно СК опорной камеры (в рассматриваемом случае – с номером i). Из (2) следует, что для оценки \mathbf{H}_{ij} в состав ОЭСПТ необходимо дополнительно включать устройство для определения дальности до объектов съемки и их ориентации относительно линий визирования камер. Как правило, таким устройством является лидар, который позволяет получить облако точек наблюдаемой области. По данному облаку определяется буфер глубины и производится построение полигональной трёхмерной модели, на которую затем выполняется наложение видеоданных [11].

Если расстояние до наблюдаемых объектов велико и выполняется условие $\|\mathbf{t}_{ij}\| \ll d$, где $\|\cdot\|$ – два-норма, то даже при отсутствии лидара в составе ОЭСПТ можно воспользоваться приближенным равенством:

$$\mathbf{H}_{ij} \approx \mathbf{K}_i \mathbf{R}_{ij} \mathbf{K}_j^{-1}. \quad (3)$$

Известно [12], что панорамное изображение с широким полем зрения целесообразно формировать в соответствии с (1) не на плоскости, а на виртуальной поверхности равномерной кривизны: как правило, сферы или цилиндра единичного радиуса, что позволяет работать с нормированными однородными пиксельными и пространственными координатами. Геометрическая постановка задачи объединения кадров $N = 3$ камер с пересекающимися полями зрения на поверхности виртуальной сферы единичного радиуса (ВСЕР) показана на рис. 1, где СК камеры с номером 0 принята за опорную [13]. Предполагается, что при $\|\mathbf{t}_{ij}\| \ll d$ по аналогии с (3) несовпадением нодальных точек объективов камер можно пренебречь и свести их в точку O центра ВСЕР. На рис. 1 символом \mathbf{M} обозначены пространственные однородные координаты точечного объекта, изображение которого проецируется на поверхность ВСЕР в точку с пространственными координатами $\mathbf{M}_{\text{сф}}$, $\|\mathbf{M}_{\text{сф}}\| = 1$, в СК $Ox_{\text{сф}}y_{\text{сф}}z_{\text{сф}}$, а символами \mathbf{x}_0 и \mathbf{x}_2 – пиксельные координаты точек с изображением $\mathbf{M}_{\text{сф}}$ на кадрах камер с номерами 0 и 2 соответственно.

Проецирование изображений на ВСЕР предполагает наличие априорной информации об угловом отклонении (крене φ и тангаже θ) СК камер относительно плоскости горизонта и в данной работе решается установкой на камеру, выбранную

опорной, инклинометра на основе трехосного инерциального микроэлектромеханического (MEMS) датчика [14], с которым связана СК $OX_{и}Y_{и}Z_{и}$.

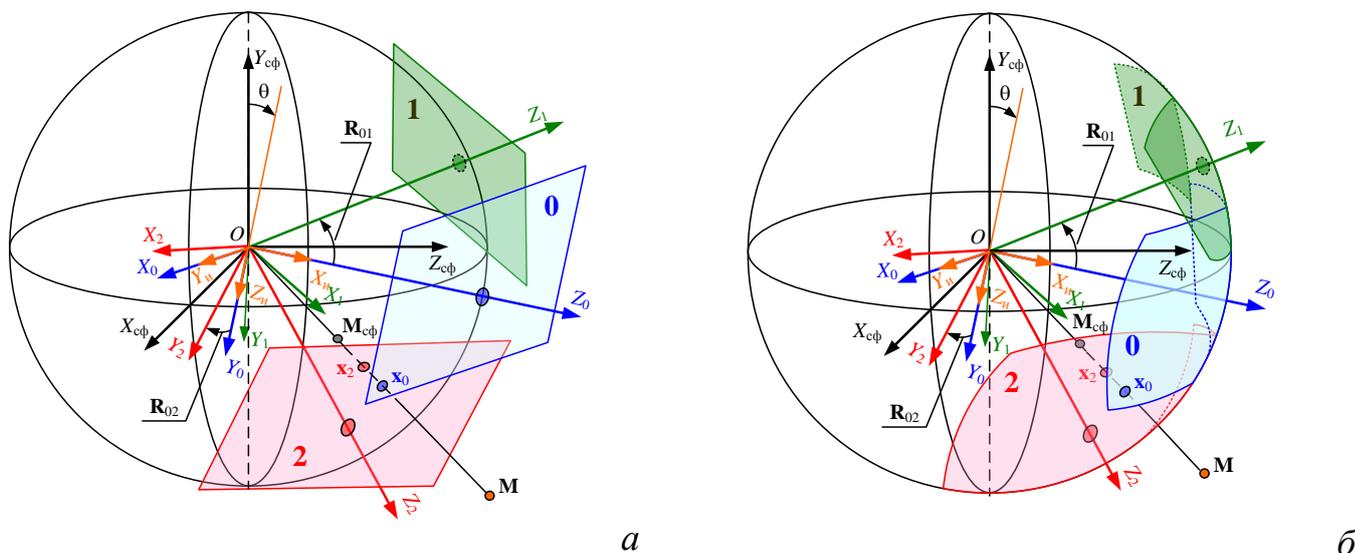


Рис. 1. Пояснение к принципу формирования сферической панорамы:

- а) взаимное угловое положение матриц камер с номерами 0, 1 и 2;
- б) результат проецирования изображений на поверхность ВСЕР

Выбор пикселей в областях, где луч виртуальной сферы $OM_{сф}$ пересекает несколько кадров, реализован по критерию минимума углового отклонения пикселя от оптической оси камеры [13]:

$$\left(\mathbf{R}_{0i}\mathbf{R}_{\varphi\theta}\right)^{\langle 3 \rangle} \cdot \mathbf{M}_{сф} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_{\varphi\theta}$ – матрица поворота системы координат опорной камеры относительно плоскости горизонта,

$$\mathbf{R}_{\varphi\theta} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

\mathbf{R}_{0i} – матрица поворота i -й камеры относительно опорной, оцениваемая во время калибровки, $\langle k \rangle$ – k -й столбец матрицы, « \cdot » – скалярное произведение векторов.

Для реализации управляемой ОИ размером $W \times H$ пикселей с угловыми размерами по горизонтали и вертикали $\Delta\varphi_w$ и $\Delta\varphi_h$ соответственно вводится кватернион $\mathbf{q}_{\text{виз}}$, задающий азимут α и угол места β линии визирования пользователя:

$$\mathbf{q}_{\text{виз}} = [\cos(\alpha/2)\cos(\beta/2), \cos(\alpha/2)\sin(\beta/2), \sin(\alpha/2)\cos(\beta/2), \sin(\alpha/2)\sin(\beta/2)]^T. \quad (6)$$

Каждому пикселю ОИ с координатами (u, v) на поверхности ВСЕР соответствует точка $\mathbf{M}_{uv} = [x_{uv}, y_{uv}, z_{uv}]^T / \|[x_{uv}, y_{uv}, z_{uv}]^T\|$ (см. рис. 2), определяемая радиус-вектором с соответствующим кватернионом:

$$\mathbf{q}_{uv} = \mathbf{q}_{\text{виз}}\mathbf{q}_{uv0}, \quad (7)$$

где из геометрических построений начальному положению ($\alpha = \beta = 0$) пикселя ОИ с координатами (u, v) соответствует кватернион

$$\mathbf{q}_{uv0} = [\cos(\alpha_u/2)\cos(\beta_v/2), \cos(\alpha_u/2)\sin(\beta_v/2), \sin(\alpha_u/2)\cos(\beta_v/2), \sin(\alpha_u/2)\sin(\beta_v/2)]^T, \quad (8)$$

В (8) приняты обозначения: α_u и β_v – соответственно азимутальное и угломестное направления на точку \mathbf{M}_{uv} :

$$\alpha_u = \arctg(x_{uv}), \beta_v = \arcsin[y_{uv}/(x_{uv}^2 + y_{uv}^2 + z_{uv}^2)^{0,5}], \quad (9)$$

где $x_{uv} = (2u/W - 1)\text{tg}(0,5\Delta\varphi_w)$, $y_{uv} = -(2v/H - 1)\text{tg}(0,5\Delta\varphi_h)$, $z_{uv} = 1$.

Кватернион \mathbf{q}_{uv} позволяет определить пространственные координаты точки \mathbf{M}_{uv} в СК ВСЕР [15]:

$$\mathbf{M}_{uv} = [2(q_x q_z + q_w q_y), 2(q_y q_z - q_w q_x), q_w^2 + q_z^2 - (q_x^2 + q_y^2)]^T, \quad (10)$$

где q_w и $[q_x, q_y, q_z]^T$ – соответственно скалярная и векторная части \mathbf{q}_{uv} .

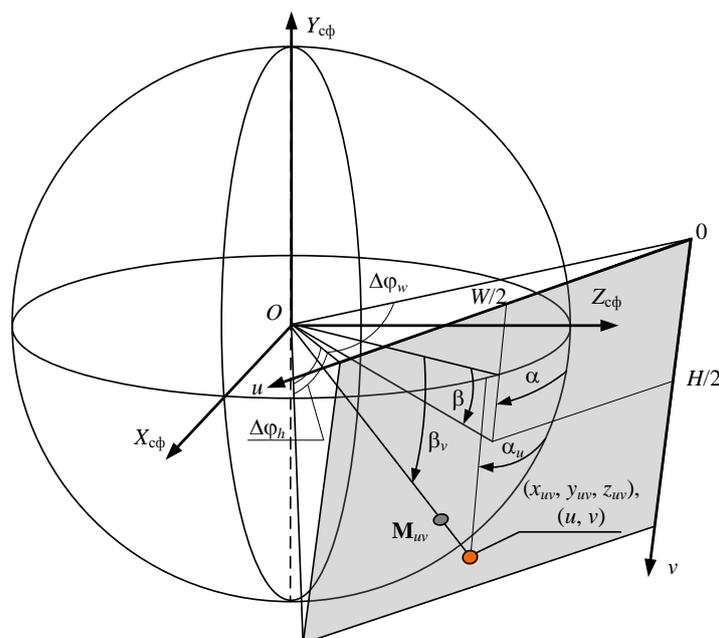


Рис. 2. Связь угловых и пространственных координат точки M_{uv} , спроецированной с плоскости изображения ОИ на поверхность ВСЕР

В плоскости изображения i -й камеры пиксельные координаты точек x_{uvi} , соответствующих точке M_{uv} , определяются через матрицу проекции [9]:

$$\mathbf{x}_{uvi} = \mathbf{P}_i \mathbf{M}_{uv}, \quad (11)$$

где $\mathbf{P}_i = \mathbf{K}_i [\mathbf{R}_{0i} \mathbf{R}_{\varphi\theta} \mid \mathbf{0}]$, $\mathbf{0} = [0, 0, 0]^T$.

Выбор пикселя, переносимого с кадра i -й камеры на ОИ, производится по критерию (6). При этом, поскольку координаты x_{uvi} являются дробными, выполняется интерполяция значения яркости по ближайшим соседям (например, билинейная).

Для уменьшения количества камер ОЭСПТ при сохранении угловых размеров её поля зрения следует выбирать камеры с широкоугольными объективами. Для таких камер дополнительно необходимо выполнять компенсацию дисторсии.

С целью уменьшения объема вычислений авторами анализируются только первые два коэффициента радиальной дисторсии модели Брауна – Конради [16].

Поскольку сюжеты, наблюдаемые каждой из камер ОЭСПТ, имеют различия, то в режиме автоматического выбора времени экспонирования средняя яркость кадров, составляющих панораму, также оказывается различной. Поэтому после заполнения ОИ дополнительно необходимо выполнение процедуры блендинга. В работе для этого применяется алгоритм из источника [17].

Алгоритм формирования изображения ОИ и его программная реализация

Алгоритм формирования изображения ОИ в ОЭСПТ содержит следующие этапы [18].

1. Инициализация: вычисление кватернионов \mathbf{q}_{uv0} (8), задающих начальные угловые направления на пиксели ОИ. При необходимости динамического изменения поля зрения ОИ перерасчет кватернионов \mathbf{q}_{uv0} выполняется в теле основного цикла.

Основной цикл

2. Оценка текущего углового положения опорной камеры ОЭСПТ по тангажу θ и крену φ по сигналам инерциального MEMS датчика [14, 15], а также соответствующей данным углам матрицы поворота по (5).

3. Вычисление кватерниона поворота для заданного углового положения линии визирования (центра ОИ) $\mathbf{q}_{виз}$ по (6) и кватернионов \mathbf{q}_{uv} , определяющих текущее угловое положение пикселей ОИ, по (7).

4. Заполнение ОИ для каждого спектрального диапазона пикселями с камер путем репроекции точек с поверхности виртуальной сферы единичного радиуса на их матрицы по (11) и (4).

5. Выполнение процедуры блендинга для ОИ каждого спектрального диапазона.

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

Поскольку для каждого пикселя ОИ обработка является однородной, это позволяет применить процедуру распараллеливания вычислений. В макете ОЭСПТ на основе ПЭВМ для реализации этапов 1, 4, 5 и 6 задействованы ресурсы видеокарты NVIDIA: весь объем вычислений с применением технологии CUDA и языка CUDA C разделен на 3072 параллельно выполняемых блока (64 по горизонтали и 48 – по вертикали) по 256 нитей в каждом (по 16 нитей по горизонтали и вертикали). При этом индексы пикселей ОИ (u, v) в соответствии с [19] представляются в виде:

$$\begin{aligned} u &= \text{blockIdx.y} * \text{blockDim.y} + \text{threadIdx.y}, \\ v &= \text{blockIdx.x} * \text{blockDim.x} + \text{threadIdx.x}, \end{aligned} \tag{12}$$

где в соответствии со стандартными для CUDA обозначениями blockIdx – идентификатор (номер) блока, blockDim – размерность блока, threadIdx – идентификатор (номер) параллельно исполняемой нити, а атрибуты x и y указывают ось системы координат двумерного евклидова пространства, вдоль которой отсчитывается идентификатор или размерность.

Поскольку копирование содержимого памяти CPU в память GPU и обратно является сравнительно медленным [19], то при реализации алгоритма формирования изображения ОИ минимизировано количество подобных операций: при инициализации в памяти GPU заполняются массивы с данными о параметрах камер

(матрицы внутренних параметров и коэффициенты дисторсии объективов) и кватернионах q_{uv0} (10) для пикселей ОИ. В основном цикле работы кадры с каждой камеры, угловые координаты линии визирования (центра ОИ) и оцененные по сигналам MEMS датчика угловые координаты копируются в память GPU, далее выполняются этапы 3-6 алгоритма и результат (массив значений яркости в ОИ) копируется обратно в память CPU для вывода на монитор ПЭВМ.

Описание макета ОЭСПТ

Макет ОЭСПТ содержит пять монохромных ТВ камер (на рис. 3. отмечены номерами 1-5) и тепловизор длинноволнового ИК диапазона (номер 6). Для согласования кадров во времени на все камеры подаются синхроимпульсы от внешнего генератора (на рис. 3 не показан). Взаимное угловое положение полей камер в секторе $200^\circ \times 120^\circ$ приведено на рис. 4.



Рис. 3. Вид макета ОЭСПТ с нумерацией камер

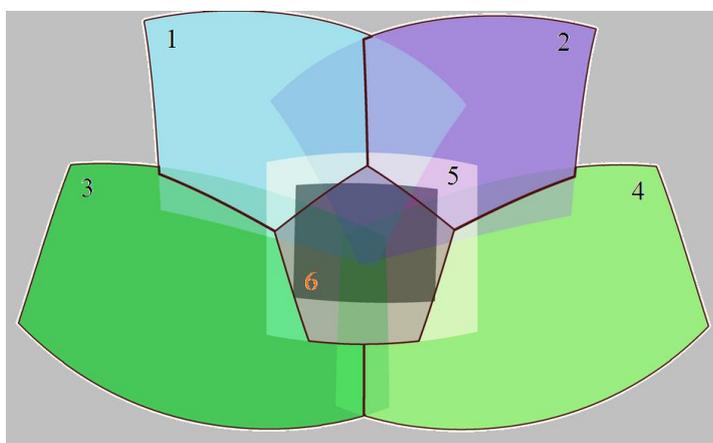


Рис. 4. Пересечение полей зрения камер ОЭСПТ

Калибровка камер макета выполняется согласно методике [20] с применением универсального ТО, обеспечивающего высококонтрастное изображение как в

диапазоне видимых, так и ИК волн [21]. Один из вариантов реализации такого ТО заключается в следующем [22]. На одной из сторон светлой пластины 1 с высокой теплопроводностью, изготавливаемой, например, из алюминия, закрепляют электронагревательный элемент 2 (рис. 5, а). На другой стороне пластины путем нанесения тонкой полимерной (например, виниловой) плёнки 3 темного цвета формируют изображение типа «шахматное поле» с априорно известной длиной стороны клетки. Для предотвращения деформации плёнки при перегреве перед электронагревательным элементом 2 устанавливают терморегулятор 4, обеспечивающий автоматическое отключение электронагревательного элемента 2 при достижении максимально допустимой температуры T_{\max} и его включение при снижении температуры шаблона ниже минимальной температуры T_{\min} , ниже которой не обеспечивается необходимый для калибровки тепловой контраст. Для обеспечения плоскостности ТО больших размеров на его обратную сторону закрепляют рёбра жёсткости 5.

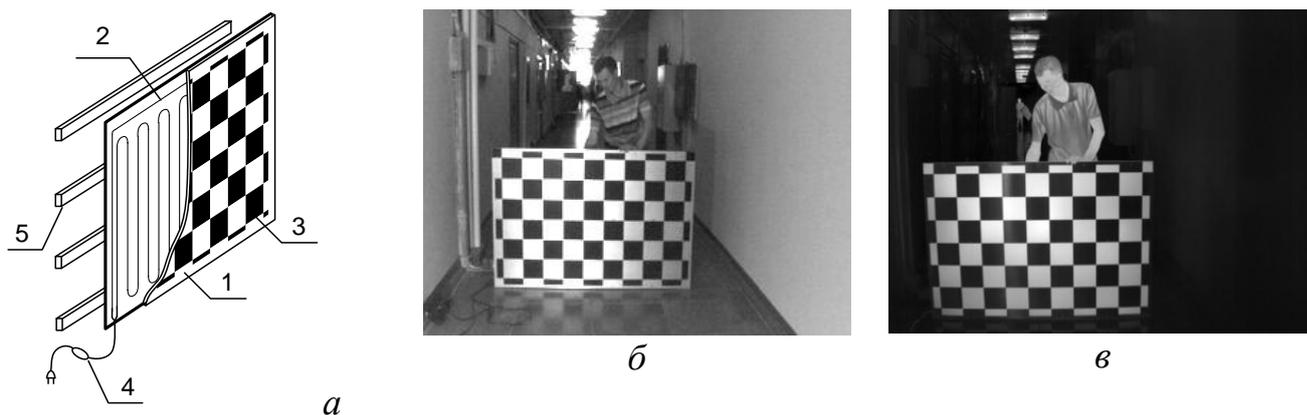


Рис. 5. Калибровка камер ОЭСПТ с помощью универсального ТО:

а – конструкция ТО, б – изображение ТО с ТВ камеры,

в – изображение ТО с ТПВ камеры

Клетки, закрытые тёмной плёнкой, на кадре ТПВ камеры формируют изображения с высокой яркостью; не закрытые – с низкой. Поэтому, чтобы изображения ТО на кадрах с ТВ (рис. 5, б) и ТПВ (рис. 5, в) камер совпадали, перед калибровкой необходимо инвертировать ТПВ кадр.

В макете ОЭСПТ реализованы следующие функции:

- управление угловым положением линии визирования оператора: по данным либо от системы позиционирования нацеленной системы целеуказания и индикации [23, 24], 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 по алгоритму [16] (рис. 6);
- повышение контрастности ТВ изображения (рис. 7) по алгоритму Multiscale Retinex [25];
- выбор режима отображения информации в ОИ: ТВ, ТПВ, псевдоцветное ТПВ (реализованы карты цветов *Jet* [26] и *Cold-to-Warm* [27]), контрастированное ТВ, комплексированное (реализовано объединение информации с формированием полутонового результата и в псевдоцветах [28]); результаты комплексирования приведены на рис. 8 и 9 соответственно;
- отображение взаимного углового положения ОИ операторов;
- отображение в ОИ полигональных областей кабины летательного аппарата без остекления, спроецированных на поверхность ОЭСПТ, при реализации режима «прозрачная кабина» путём затемнения соответствующих областей

исходного кадра в ОИ; угловые координаты линии визирования оператора на рис. 10: азимут – 60° , угол места – минус 10° .

Пример видеоролика с работой макета ОЭСПТ доступен по ссылке [29].

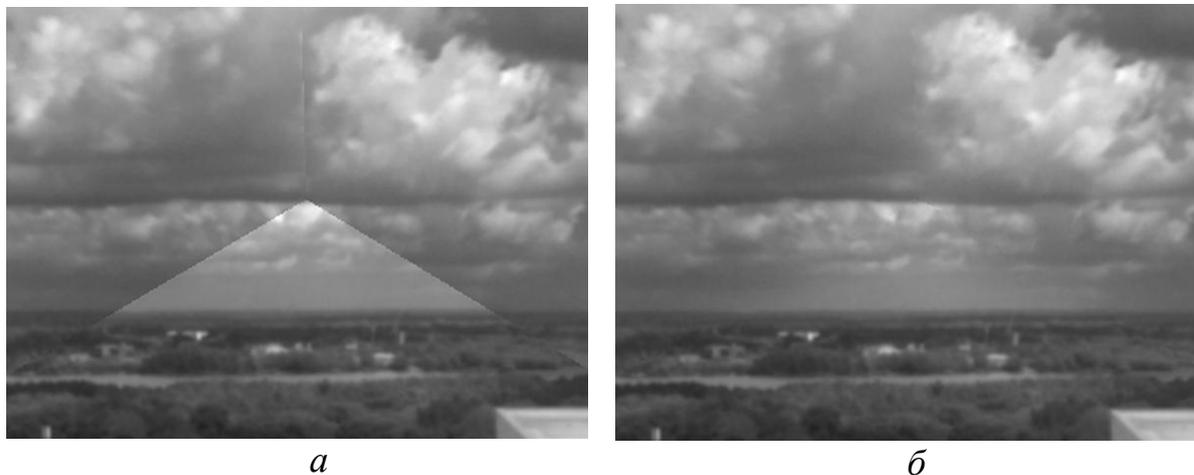


Рис. 6. Иллюстрация к процедуре блендинга

(условия наблюдения – облачность, 3х цифровой зум):

а – исходный кадр в ОИ, *б* – кадр ОИ после блендинга



Рис. 7. Результаты применения модифицированного алгоритма

Multiscale Retinex (условия наблюдения – солнечный день):

а – исходный кадр, *б* – после контрастирования

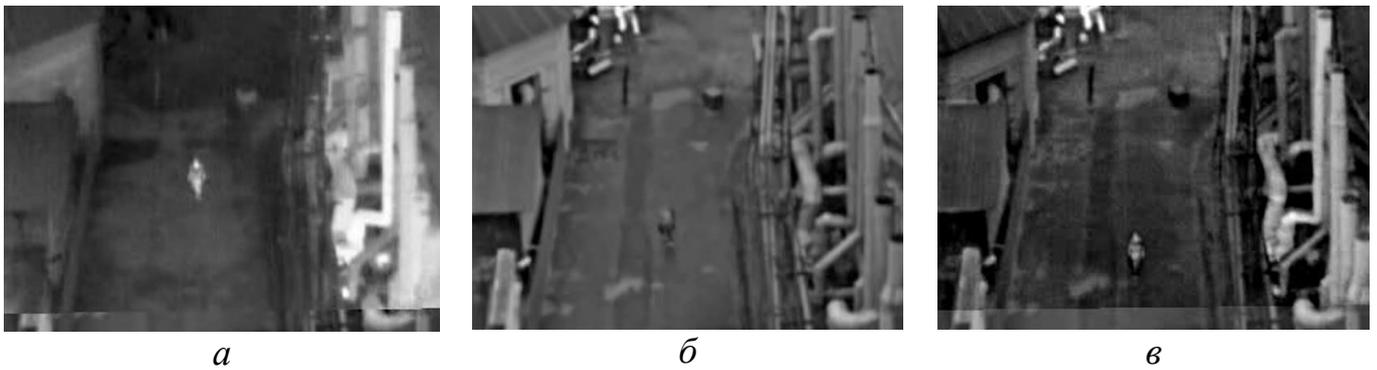


Рис. 8. Результаты комплексирования ТВ и ИК каналов

(условия наблюдения – мелкий дождь):

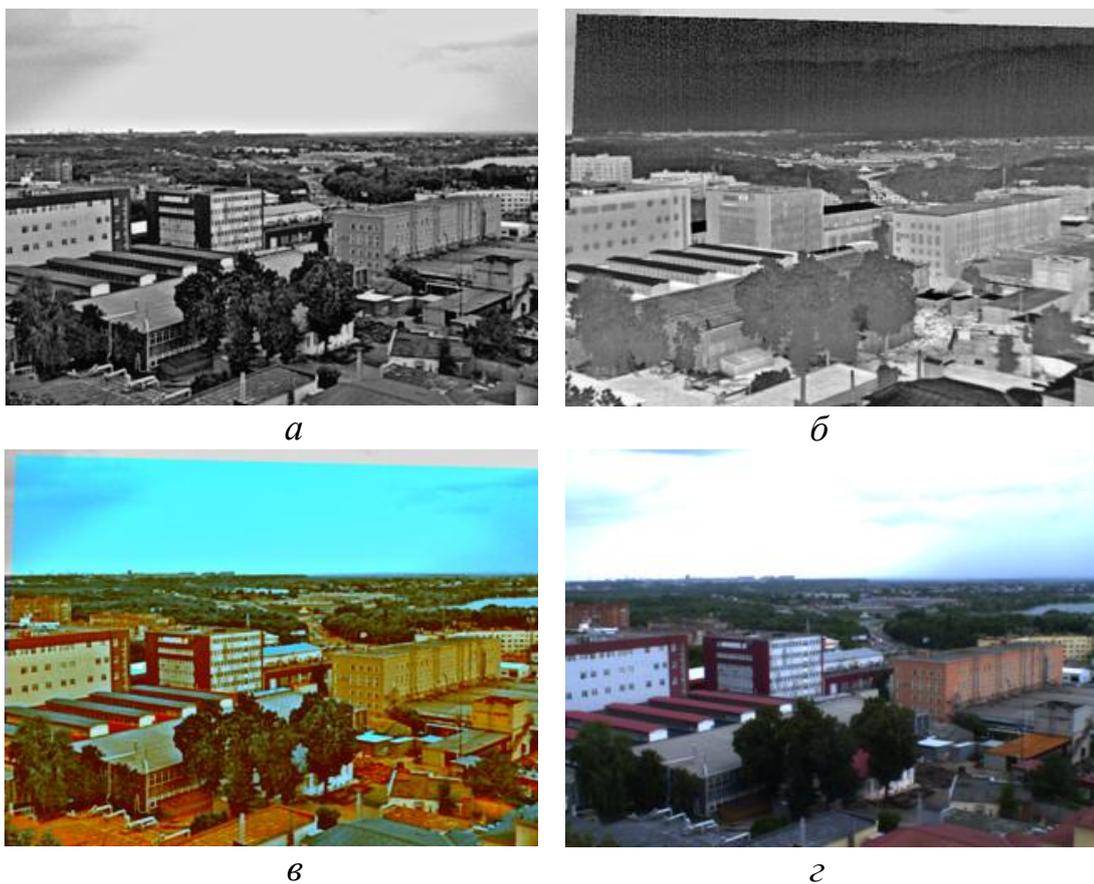
а – ТПВ кадр, *б* – ТВ кадр, *в* – кадр в режиме комплексирования

Рис. 9. Результаты комплексирования в псевдоцветах:

а – ТВ изображение, *б* – ТПВ изображение, *в* – изображение в псевдоцветах, полученное из *а*) и *б*) по алгоритму [28], *г* – кадр с цветной камеры

Макет (в настоящий момент) содержит единственную ТПВ камеру, поэтому режим комплексирования информации от ТВ и ИК видеоканалов реализуется только при угловых положениях ОИ, содержащих часть области б (см. рис. 4); в противном случае пользователю выводится информация только от ТВ камер (нижние строки кадра рис. 8, а).

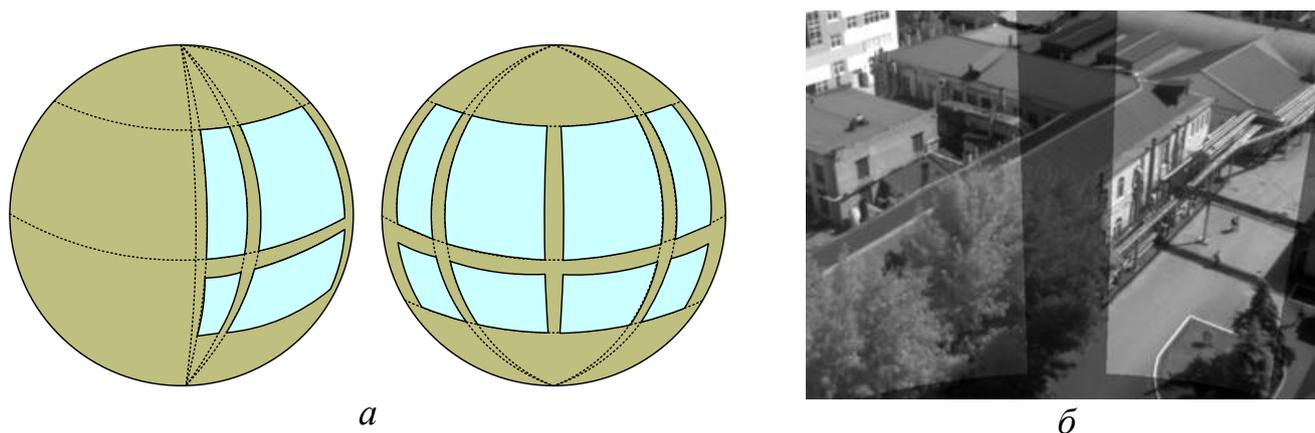


Рис. 10. Отображение ОИ в режиме «прозрачная кабина»:

а – проекция остекления кабины на ВСЕР, вид сбоку и спереди; б – изображение ОИ

На GPU NVIDIA GeForce GTX 560 Ti (384 ядра) при максимальном объеме вычислений (блендинг, комплексирование в псевдоцветах контрастированного ТВ и ИК каналов, отображение контуров кабины) и размере ОИ 1024×768 пикселей средствами NVIDIA CUDA для каждого из двух операторов обеспечивается темп обновления информации в ОИ не менее 30 Гц.

Заключение

Технология формирования панорамного изображения с независимым выбором персональной области интереса в авиационных обзорных системах технического зрения обеспечивает повышение ситуационной осведомленности экипажа в

сложных условиях пилотирования. Режимы улучшения видения и комплексирования информации в персональной области интереса позволяют повысить вероятность обнаружения и распознавания представляющих интерес объектов в условиях недостаточной видимости.

Библиографический список

1. Бельский А., Жосан Н., Брондз Д., Горбачев К., Гребенщиков В., Каргаев А. Круглосуточная панорамная система технического зрения для вертолетов // Фотоника. 2013. Т. 38. № 2. С. 80 - 86.
2. AN/AAQ-37 Distributed Aperture System (DAS) for the F-35, available at: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAAQ37F35/Pages/default.aspx>
3. IronVision™, available at: <http://elbitsystems.com/media/IronVision.pdf>
4. Князь В.В., Бусурин В.И. Автоматическое обнаружение препятствий на взлётно-посадочной полосе средствами технического зрения // Труды МАИ. 2015. №. 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57706>
5. Костяшкин Л.Н. Никифоров М.Б. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения. - М.: Физматлит, 2016. - 234 с.
6. Бондаренко А., Бондаренко М. Аппаратно-программная реализация мультиспектральной системы улучшенного видения // Современная электроника. 2017. № 1. С. 32 - 37.
7. Ikeda S., Sato T., Yokoya N. A calibration method for an omnidirectional multi-camera system // Proc. SPIE Electronic Imaging, 2003, vol. 5006, pp. 499 - 507.

8. Горбулин В.И., Ходор М.А. Методика распределения полей зрения средств наблюдения в зоне ответственности // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93426>
9. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision: 2nd edition. Cambridge, Cambridge University Press, 2003, 656 p.
10. Brown M., Lowe D. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features // International Journal of Computer Vision, 2007, vol. 74(1), pp. 59 - 73.
11. Геворков С.Ю., Ильичев О.А., Иванченко Д.Л., Павлюченков А.В. Способ автоматизированного создания трехмерных систем городских панорам на основе данных лазерного сканирования. Патент 2601165 РФ. Бюлл. № 25, 10.09.16.
12. Szeliski R. Image alignment and stitching: a tutorial // Foundations and trends in computer graphics and vision, 2006, vol. 2(1), pp. 1 - 104.
13. Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С., Храмов М.Ю. Алгоритм формирования видеопанорамы и его программная реализация с применением технологии CUDA // III Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». Сборник трудов. (Самара, 25-27 апреля 2017). - Самара: Изд-во «Новая техника», 2017. С. 1580 - 1586.
14. Мишин А.Ю., Кирюшин Е.Ю., Обухов А.И., Гурлов Д.В. Малогабаритная бесплатформенная инерциальная система на микромеханических датчиках // Труды МАИ. 2013. № 70. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=44533>
15. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 512 с.

16. Brown D.C. Close-Range Camera Calibration // Photogrammetric Engineering, 1971, vol. 37(8), pp. 855 - 866.
17. Burt P., Adelson E. A Multiresolution Spline with Application to Image Mosaics // ACM Transactions on Graphics, 1983, vol. 2(4), pp. 217 - 236.
18. Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С., Храмов М.Ю. Формирование видеопанорамы по информации от разноспектральных камер // IV Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». Сборник трудов. (Самара, 24-27 апреля 2018). - Самара: Изд-во «Новая техника», 2018. С. 568 - 575.
19. Sanders J., Kandrot E. CUDA by Example, New York, Addison-Wesley, 2010, 290 p.
20. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, vol. 22(11), pp. 1330 - 1334.
21. St-Laurent L., Mikhnevich M., Bubel A., Prevost D. Passive Calibration Board for Alignment of VIS-NIR, SWIR and LWIR Images // Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2017, vol. 14(2), pp. 193 - 205.
22. Кудинов И.А., Павлов О.В., Холопов И.С. Тестовый шаблон для калибровки видеодатчиков многоспектральной системы технического зрения. Патент 2672466 РФ. Бюлл. № 32, 14.11.2018.
23. Костяшкин Л.Н., Павлов О.В. Нашлемные системы целеуказания и индикации для самолетов и вертолетов // Обозрение армии и флота. 2015. № 2. С. 64 - 66.
24. Костяшкин Л.Н., Павлов О.В., Трофимов Д.В. Проблемные аспекты разработки нашлемных систем целеуказания и индикации для вертолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 3. С. 57 - 63.

25. Jobson D.J., Rahman Z., Woodell G.A. A Multiscale Retinex for Bridging the Gap between Color Images and the Human Observation of Scenes // IEEE Trans. on Image Processing, 1997, vol. 6(7), pp. 965 - 976.
26. MATLAB Jet Array, available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/jet.html>
27. Moreland K. Diverging Color Maps for Scientific Visualization (Expanded) // Proc. of 5th International Symposium of Advances in Visual Computing (ISVC-2009). Part II. Las Vegas, 2009, pp. 92 - 103.
28. Li G., Xu S., Zhao X. Fast color-transfer-based image fusion method for merging infrared and visible images // Proc. of the SPIE, 2010, vol. 7710, pp. 77100S.
29. Макет видеопанорамы из 5 камер и тепловизора, available at: <https://www.youtube.com/watch?v=HHdj0JcKpI8>

Статья поступила в редакцию 15.12.2018