

На правах рукописи



Бондаренко Максим Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОВМЕЩЕНИЯ
2D И 3D ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
УЛУЧШЕННОГО И СИНТЕЗИРОВАННОГО ВИДЕНИЯ**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена на кафедре Автоматизации систем вычислительных комплексов факультета Вычислительной математики и кибернетики (ВМК) Московского государственного университета (МГУ) имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Сухомлин Владимир Александрович**, начальник лаборатории «Открытые информационные технологии» при факультете ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Михайлюк Михаил Васильевич**, заведующий отделом программных средств визуализации Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

кандидат технических наук, **Плоткин Дмитрий Арнольдович**, научный сотрудник компании «Акционерное общество "ИНТЕЛ А/О"» (АО "Интел А/О")

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **"Рязанский государственный радиотехнический университет"** (ФГБОУ ВО "РГРТУ")

Защита состоится «18» октября 2016 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.131.05 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технологический университет» (МИРЭА) по адресу: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, ауд. Д117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИРЭА и на сайте www.mirea.ru

Автореферат диссертации разослан «1» сентября 2016 года.

Учёный секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент



Андрианова Е. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Информированность экипажа воздушного судна в плохих условиях видимости при заходе на посадку, посадке и рулении остаётся важной задачей обеспечения безопасности полётов. К наиболее перспективным системам обеспечения визуального представления внешнего пространства в сложных условиях видимости относят авиационные бортовые человеко-машинные системы комбинированного видения (СКВ), которые представляют собой совокупность систем синтезированного видения (ССВ) и улучшенного видения (СУВ). СКВ сопоставляет и объединяет синтезированные изображения, сформированные по трёхмерной виртуальной модели местности (ВММ) и данным от навигационной системы (НС), с видеопоследовательностью, полученной с бортовых камер (СУВ) летательного аппарата (ЛА). Однако НС имеет погрешности, из-за которых ракурс изображения ВММ, синтезируемого виртуальным датчиком, не соответствует ракурсу съёмки бортовыми видеодатчиками, поэтому необходима процедура совмещения сенсорного и синтезированного изображений.

Разработка и усовершенствование СКВ производится в рамках перспективной концепции авионики нового поколения, которая основывается на совмещении информации с датчиков всех бортовых подсистем с целью формирования объективной картины внешней обстановки для обеспечения ситуационной осведомлённости более высокого уровня. В настоящее время к данной концепции делаются первые шаги.

Темой совмещения изображений с ВММ (совмещение 2D и 3D информации) активно занимается много исследователей и инженеров, как в России, так и за рубежом. Однако у найденных подходов присутствуют недостатки, которые связаны либо с невозможностью универсального применения, либо с вычислительной трудоёмкостью, не позволяющей их использовать на реальных бортовых вычислителях, либо с низким качеством совмещения составляющих совокупного изображения.

После совмещения изображений возникает задача представления результата их совмещения, т. е. получения комбинированного изображения, содержащего необходимую для пилотирования информацию, как с сенсорного изображения, так и с синтетического. Специальных статей, посвящённых задаче комплексирования именно сенсорных и синтетических изображений, выявлено не было. Зарубежные публикации,

рассматривающие задачу совмещения таких изображений, уделяют недостаточно внимания этой теме. Подавляющее большинство работ, посвящённых методам комплексирования изображений, носит эвристический характер с отсутствием их объективной количественной оценки.

Эффективность комплексирования изображений определяется тем, насколько информативны они для пилота. Количественная оценка информативности изображения должна учитывать особенности зрительного восприятия изображений. Однако во всех рассмотренных работах оценку информативности комбинированных изображений отождествляют с абстрактной оценкой «качества комбинированных изображений». В качестве такой оценки обычно выбирают суперпозицию статистических показателей исходных изображений и результата их комплексирования, таких как, например, корреляция, средние значения и дисперсии яркости их пикселей. Как правило, предлагаемая авторами мера оценки «согласуется с визуальной оценкой качества изображений». Но на самом деле понятия «качество» и «информативность» изображения не тождественны: изображение может быть качественным (не содержать шумов, иметь высокий контраст и т. д.), но при этом быть бессодержательным.

Несмотря на большой объём работы предшественников, выше отмеченные задачи совмещения сенсорных изображений с проекциями ВММ и последующего их комплексирования проработаны недостаточно: в ходе детального обзора не было выявлено алгоритмов, достаточно эффективных для решения этих задач.

Объект исследования – авиационная СКВ и алгоритмы, реализующие её работу.

Область исследования – определена предметной областью № 7 паспорта специальности 05.13.11, «Человеко-машинные интерфейсы; модели, методы, алгоритмы и программные средства машинной графики, визуализации, обработки изображений, систем виртуальной реальности, мультимедийного общения».

Целью работы является разработка и применение эффективных алгоритмов совмещения и комплексирования изображений для авиационных СКВ.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработан универсальный и вычислительно эффективный алгоритм совмещения изображений, получаемых от бортовых сенсоров, с изображениями, формируемыми в бортовом вычислителе по ВММ.
2. Разработан метод сравнительной оценки алгоритмов комплексирования (на основе их информативности).
3. Разработан эффективный алгоритм комплексирования сенсорных изображений и соответствующих им синтетических изображений, формируемых по ВММ.
4. Создана программная реализация разработанных алгоритмов и произведена их экспериментальная проверка на модельных и реальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Разработан новый алгоритм совмещения 2D и 3D информации, лишённый недостатков, присущих известным алгоритмам в данной предметной области, таких как частность применения, высокая вычислительная сложность и низкая надёжность из-за большого числа этапов, связанных с автоматическим распознаванием объектов на изображениях.
2. Получена количественная оценка качества работы алгоритмов совмещения изображений на наборах модельных данных, позволяющая однозначно судить о возможности их применения, согласно авиационному руководству Р-315.
3. Предложено эффективное с позиции разработанной количественной оценки информативности применение известного метода 3D фильтрации для комплексирования сенсорных и синтетических изображений.
4. Предложена и обоснована модификация метода 3D фильтрации (взвешенное усреднение) для комплексирования незашумлённых сенсорных и синтезированных изображений. Полученный результат характеризуется отсутствием слабого размытия деталей на комбинированном изображении по сравнению с исходным методом.
5. Предложена и обоснована модификация алгоритма комплексирования сенсорных изображений «на основе оценки информативности». Полученный результат характеризуется более высоким уровнем сохранения деталей от комбинируемых изображений по сравнению с оригинальным подходом.
6. Предложен алгоритм количественной оценки информативности изображений, скомбинированных различными способами. Данная оценка согласуется с визуальным восприятием.

Теоретическая значимость исследования состоит в проведенном детальном анализе ключевых аспектов исследуемой темы. Представленные в научных статьях результаты восполняют существующие пробелы и дополняют результаты предшественников по принципиально важным вопросам:

- совмещение и комплексирование разнородных изображений,
- оценка эффективности методов совмещения и комплексирования изображений.

Практическая ценность заключается в разработке программно-алгоритмического обеспечения работы СКВ, включающей в себя все предлагаемые алгоритмы и в выполнении эффективной аппаратной реализации метода 3D фильтрации [5, 8]. Качество работы реализованных алгоритмов удовлетворяет требованиям нормативных авиационных документов (Р-315) применительно к СКВ, что позволило осуществить практическое внедрение полученных результатов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись алгоритмы обработки цифровых изображений (коррекция, оценка схожести, фильтрация), методы компьютерной графики для визуализации 3D моделей и формирования цифровых синтезированных изображений, методы минимизации функций, метод фильтрации по Калману, методы компьютерного моделирования с использованием синтетических и реальных изображений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм совмещения 2D и 3D информации.
2. Метод количественной оценки качества работы алгоритма совмещения 2D и 3D информации.
3. Новое применение известного алгоритма 3D фильтрации для комплексирования сенсорных и им соответствующих синтетических изображений и его модификация.
4. Метод количественной оценки информативности комбинированных изображений.
5. Структура испытательного программного стенда, реализующего работу разработанных алгоритмов в рамках системы комбинированного видения.

Апробация результатов работы. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных конференциях «Системы технического зрения в процессах управления» (2012-2015), «Информационные технологии и ИТ-образование» (2013), «Навигация, наведение и

управление летательными аппаратами» (2015). Результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из которых три соответствуют списку ВАК [1 – 3].

Результаты диссертационной работы внедрены в федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх структурированных глав, заключения, списка использованной литературы из 74 источников и приложения. Общий объём диссертации – 113 страниц. Работа содержит 52 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава «Обзор и анализ существующих методов совмещения 2D и 3D информации» посвящена обзору известных по открытой печати методов совмещения и комплексирования плоских цифровых изображений местности с проекциями их трёхмерных моделей.

Все известные алгоритмы совмещения можно разделить как по способу сопоставления совмещаемых изображений, так и по способу их совмещения. По сопоставлению изображений методы делятся на корреляционные и структурные. Если в корреляционно-экстремальных методах производится сопоставление изображений по яркости их пикселей, то в структурных подходах анализируемые изображения описываются в терминах наличия характерных особенностей – контуров, линий, угловых точек, объектов и т. п. По способу совмещения алгоритмы разделяются на методы, геометрически преобразующие изображения, и на методы, уточняющие параметры съёмки виртуальной камерой, такие как её положение и ориентация в ВММ, с последующей генерацией синтетического изображения по уточнённым параметрам. Показано, что класс структурных методов совмещения с уточнением параметров съёмки даёт наиболее качественные результаты совмещения.

В рамках проведённого аналитического обзора известных методов комплексирования изображений обоснована новая область применения метода 3D фильтрации для слияния сенсорных и синтезированных изображений за счёт схожести способа формирования синтезированных изображений с принципом работы реальных видеодатчиков, а также близости ВММ с реальной подстилающей поверхностью.

Предложена модификация метода комплексирования «на основе оценки информативности». В исходном алгоритме оценивается «информативность» участка вокруг каждого пикселя путём использования скользящего окна по изображению:

1. На каждой позиции (x, y) скользящего окна размером $(2k + 1) \times (2k + 1)$ элементов по первому изображению $I_1(x, y)$ размером $W \times H$ пикселей рассчитывается среднеквадратическое отклонение (СКО) для центрального элемента в окне:

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{k} \sqrt{\sum_{i=x-k}^{x+k} \sum_{j=y-k}^{y+k} (I_1(i, j) - I_1(x, y))^2}, \quad (1)$$

$$x - k \geq 0, \quad x + k < W, \quad y - k \geq 0, \quad y + k < H.$$

2. Рассчитывается максимальное значение СКО для изображения $I_1(x, y)$:

$$\sigma_1(x, y) = \max_{x, y} \sigma(x, y) \quad (2)$$

Операции 1 и 2 повторяются для второго изображения $I_2(x, y)$.

3. Комбинированное изображение I_K определяется по формуле:

$$I_K = \frac{\sigma_1 I_1 + \sigma_2 I_2}{\sigma_1 + \sigma_2}, \quad (3)$$

которая в модифицированном методе имеет вид:

$$I'_K = \frac{\sigma_2 I_1 + \sigma_1 I_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (4)$$

Вес каждой составляющей комбинированного изображения в модифицированном методе зависит от степени детальности и силы контрастов другой составляющей. Только в этом случае полезная информация из любого информационного канала $I_{1,2}$ не будет «забита» на результирующем изображении другим информационным каналом, что позволяет существенно лучше сохранять локальные контрасты от обоих комплекслируемых каналов.

Во второй главе «Разработка алгоритма совмещения 2D и 3D информации» приводится общая структура предлагаемого алгоритма совмещения изображений. Указанный подход вписывается в более общую концепцию систем технического зрения для мобильной техники [7] (см. рисунок 1).

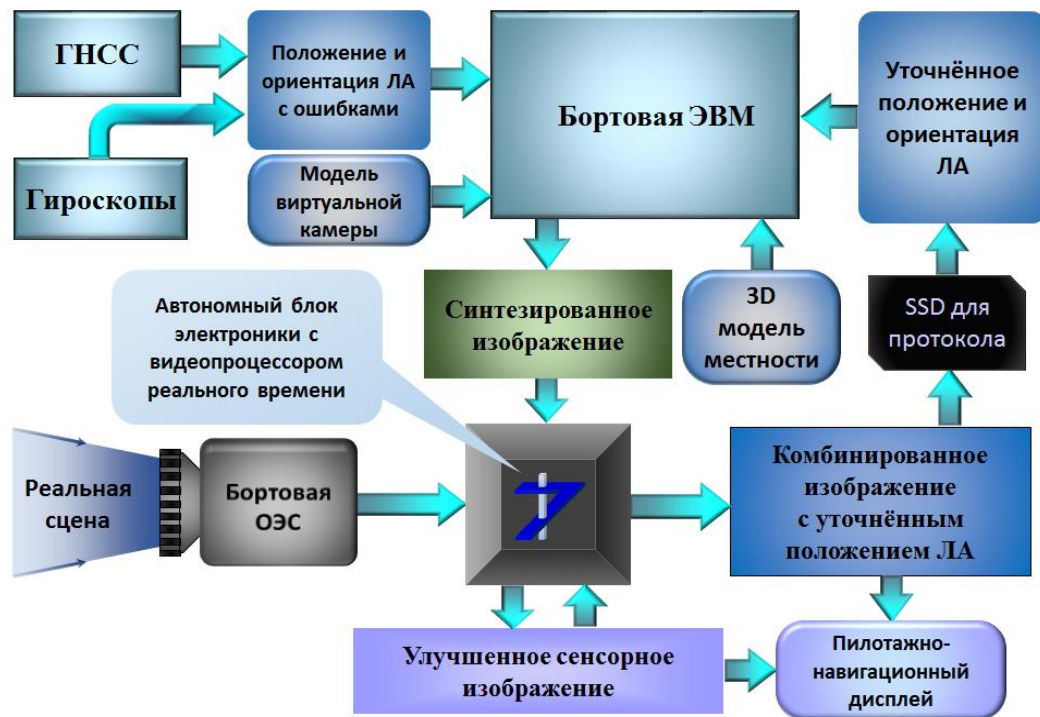


Рисунок 1. Общая схема работы системы комбинированного видения (СКВ)

На рисунке 1 с глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) поступают данные о положении ЛА, а с гироскопов – данные о его ориентации. На основании модели виртуальной камеры, ВММ и текущим измерениям положения и ориентации формируется синтезированное изображение. При этом параметры сенсорной и виртуальной камер должны совпадать. С бортовой оптико-электронной системы (БОЭС) в свою очередь поступают сенсорные изображения реальной сцены.

Далее описывается процесс формирования синтезированного изображения по ВММ, положению и ориентации ЛА и используемой модели формирования изображений, которая представляет собой матричное преобразование ВММ – последовательное произведение матрицы сдвига с матрицей поворота по трём углам ориентации в пространстве и с матрицей перспективного проецирования. Его параметры – угловые размеры поля зрения, разрешение в эффективных пикселях, а также положение и ориентация бортового видеодатчика (ЛА).

Для совмещения изображений необходимо найти элементы на обоих изображениях, отвечающие одним и тем же объектам (частям объектов). Известные методы совмещения применяют процедуру автоматического распознавания схожих особенностей для *обоих* совмещаемых кадров, что понижает надёжность отождествления и усложняет логику работы. В предлагаемом алгоритме за счёт использования ВММ не только для получения синтезированных изображений, но и

для автоматического извлечения центров заведомо известных топологических особенностей (ТО) для их привязки, применяется процедура распознавания ТО только для сенсорных изображений. Это требует ввод априорной информации в ВММ о том, какие точки в пространстве ВММ следует считать центрами особенностей, годных для привязки. Однако это не ограничивает универсальность применения, поскольку любые ВММ в современных авиационных системах создаются вручную на основании реальных измерений и данных космической или аэрофотосъёмки.

В предлагаемом алгоритме совмещения за эталонные области принимаются части синтезированного изображения, чтобы избежать ситуации, когда за ТО на сенсорном кадре может быть принята особенность, быстро меняющаяся во времени или заведомо отсутствующая в ВММ. Кроме того, на синтезированных изображениях отсутствуют шумы и засветки, и можно автоматически извлекать одни и те же ТО для любых параметров виртуальной камеры.

В первую очередь, следует выбирать только те центры ТО, которые расположены в области кадра. Также важно, чтобы ТО находились не слишком далеко от центра виртуальной камеры, что определяется разрешающей способностью БОЭС. Координаты центра ТО в ВММ могут лежать на грани объекта или на его вершинах. Поэтому производится проверка их видимости. Все невидимые точки в области кадра следует исключить с помощью, например, детектора границ. Эффективный результат даёт известный оператор Собеля.

После получения центров ТО необходимо получить эталонные изображения ТО (ИТО) на синтезированном кадре. Квадратные ИТО формируются вокруг центров ТО на кадрах, переведённых в оттенки серого, вычисляется модуль градиента с помощью оператора Собеля и производится линейная коррекция яркости (см. рисунок 2). Размер ИТО порядка 20×20 пикселей даёт достаточную устойчивость к шуму и дискретизации, а также позволяет с достаточной устойчивостью сравнивать ИТО частей сцены, находящихся в различных ракурсах. Использование модуля градиента монохромного изображения обеспечивает инвариантность к цветовым и яркостным составляющим.



Рисунок 2. Способ формирования изображения ТО (угол здания)

Далее на сенсорном изображении выделяются области поиска ТО. Их центры соответствуют центрам ТО на синтезированном изображении, а размеры определяются погрешностями бортовой НС. Целесообразно использовать размеры, превышающие размеры ИТО. Для каждой ТО на синтезированном кадре ищут ей соответствующую ТО на сенсорном изображении. Внутри области поиска формируются всевозможные ИТО и вычисляется мера их отклонения от эталонного ИТО. Критерий поиска определяется выражением:

$$D = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} [L_R(x, y) - L_S(x, y)]^2, \quad (5)$$

где N – линейный размер по ширине и высоте сопоставляемых ИТО, $L_R(x, y)$ и $L_S(x, y)$ – яркости пикселей на сенсорном R и синтезированном S ИТО.

Так как в локальной области поиска минимум различия между ИТО всегда существует, то он должен быть достаточно выраженным. Иначе будет иметь место ложное распознавание ТО. Надёжный результат даёт адаптивное условие, зависящее от значения (5) в фиксированной области поиска K , при выполнении которого искомая ТО учитывается на этапе уточнения местоположения и ориентации виртуальной камеры:

$$\min_K D < 0,25 \max_K D \quad (6)$$

Уточнённые параметры виртуальной камеры: положение (x, y, z) и углы ориентации (ψ, θ, γ) – курс, тангаж и крен соответственно находятся путём минимизации функции невязки расстояний между центрами соответствующих ТО. Функция невязки $S(x, y, z, \psi, \theta, \gamma)$ задаётся как функция от суммы квадратов расстояний между соответствующими пикселями изображений:

$$S(x, y, z, \psi, \theta, \gamma) = \sum_{i=1}^N [(Q_i \cdot X - P_i \cdot X)^2 + (Q_i \cdot Y - P_i \cdot Y)^2] + \delta^2, \quad (7)$$

где $(Q_i.X, Q_i.Y)$ – координаты центрального пикселя ТО найденной на сенсорном изображении; $(P_i.X, P_i.Y)$, $P_i = P\{x, y, z, \psi, \theta, \gamma, (X_i, Y_i, Z_i)\}$ – координаты центрального пикселя соответствующей ТО на синтезированном изображении, полученные действием оператора перспективного проецирования P на точку (X_i, Y_i, Z_i) в пространстве ВММ из положения и ориентации виртуальной камеры $(x, y, z, \psi, \theta, \gamma)$, N – число точек-центров ТО, $\delta = const \neq 0$ – для положительной определённости функции (7).

Минимум функции $S(x, y, z, \psi, \theta, \gamma)$ ищется на компактном множестве

$$K = \{x \pm \delta x, y \pm \delta y, z \pm \delta z, \psi \pm \delta \psi, \theta \pm \delta \theta, \gamma \pm \delta \gamma\}, \quad (8)$$

где $\delta x, \delta y, \delta z, \delta \psi, \delta \theta, \delta \gamma$ – известные максимальные погрешности бортовой НС. Его можно найти известным методом покоординатного спуска, что обосновано ниже.

Однозначность функции (7) гарантирует условие наличия не менее трёх ТО на изображении ($N \geq 3$), которые в ВММ не лежат на одной прямой. Функция (7) непрерывна в силу непрерывности оператора проецирования P и имеет положительно определённую квадратичную форму для любых $(x, y, z, \psi, \theta, \gamma)$. Тогда достигается единственный минимум функции (7) на множестве (8) методом покоординатного спуска, согласно известной теореме о его сходимости. Покоординатные минимизации функции (7) могут производиться известным методом деления отрезка пополам. Для сходимости метода покоординатного спуска требуется не более 5 итераций и на каждой итерации не нужно обрабатывать изображения, а только получать проекции уже известных ТО и вычислять целевую функцию (7).

Окончательно значения уточнённых параметров виртуальной камеры подаются в память бортового вычислителя, где синтезируется новое изображение для комплексирования с сенсорным кадром.

Таким образом, наиболее вычислительно трудоёмкий этап предлагаемого алгоритма совмещения – поиск ТО на сенсорном изображении, соответствующих ТО на синтезированной проекции ВММ. Его вычислительная трудоёмкость зависит от числа N ТО на синтезированном изображении и оценивается в $\underline{O}(Na^2W^2)$ арифметических операций умножения и сложения, где a^2 – размер ТО, W^2 ($W > a$) – размер областей поиска ТО на сенсорном изображении. Вычислительные эксперименты показали, что для качественного совмещения целесообразно иметь от 3 до 10 ТО ($3 \leq N \leq 10$). Сложность остальных этапов пренебрежимо мала, поэтому

вычислительная сложность предлагаемого алгоритма совмещения также оценивается как $\underline{O}(Na^2W^2)$. Выполнение процедуры совмещения выполняется со скоростью 6 – 7 кадров в секунду без использования ресурсов видеокарты и распараллеливания на процессоре Intel Core i7-4770 с тактовой частотой 3,4 ГГц при $N = 10$, $a = 21$, $W = 61$, что позволяет сделать вывод о возможности реализации данного алгоритма на специализированных видеопроцессорах в реальном масштабе времени (25 кадров в секунду).

В динамике полёта меняется количество и структура расположения изображений ТО на паре совмещаемых кадров, что может приводить к резким скачкам и дрожаниям деталей комбинированного кадра. Для «сглаживания» используется фильтрация по Калману. Для оценки положения допускается, что движение в течение n измерений равномерно и прямолинейно:

$$x(t) = b_0 + b_1 t, t = \overline{t_0, t_{n-1}}. \quad (9)$$

Для углов ориентации качественную фильтрацию обеспечивает гипотеза о гармоническом законе движения:

$$x(t) = b_0 + b_1 \sin ct + b_2 \cos ct, c = \frac{\pi}{180}, t = \overline{t_0, t_{n-1}}. \quad (10)$$

Согласно независимости измерений НС имеем 6 одномерных фильтров Калмана. Для оценки положения ЛА фильтр имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_0 \\ 1 & t_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_{n-1} \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

A – матрица аргументов гипотетического закона движения, b – вектор его коэффициентов, $x \in \{X, Y, Z\}$ – вектор измерений координаты. Решаем систему $Ab = x$ известным методом наименьших квадратов (МНК):

$$\tilde{b} = (A^T A)^{-1} A^T x, \quad (12)$$

тогда текущее отфильтрованное значение координаты x вычисляется как

$$\tilde{x}_{n-1} = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 t_{n-1}. \quad (13)$$

Для оценки углов ориентации ЛА фильтр имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \sin ct_0 & \cos ct_0 \\ 1 & \sin ct_1 & \cos ct_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin ct_{n-1} & \cos ct_{n-1} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

A – матрица аргументов гипотетического закона движения, b – вектор его коэффициентов, $\alpha \in \{\Psi, \Theta, \Gamma\}$ – вектор измерений угла ориентации.

Решаем систему $Ab = \alpha$ с помощью МНК:

$$\tilde{b} = (A^T A)^{-1} A^T \alpha, \quad (15)$$

тогда текущее отфильтрованное значение координаты α вычисляется как

$$\tilde{\alpha}_{n-1} = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \sin ct_{n-1} + \tilde{b}_2 \cos ct_{n-1}. \quad (16)$$

При увеличении размера n скользящего окна фильтра повышается плавность траектории, но происходит её рассогласование по времени по отношению к истинной. При уменьшении – наоборот, понижается плавность, но уходит рассогласование. Приемлемый результат даёт учёт ~ 50 кадров ($n = 50$) предыдущих измерений ориентации и ~ 100 кадров ($n = 100$) измерений положения.

Так как СКВ, включает в себя три основных подсистемы (см. рисунок 1): СУВ, ССВ и НС, то допущения при её моделировании будут касаться этих подсистем. Считаем, что НС делает только 6 измерений через заданные промежутки времени: широта X , долгота Z , высота Y , углы курса Ψ , тангажа θ и крена γ ЛА. Измерения независимы, а их ошибки нормально распределены с нулевыми мат. ожиданиями и со СКО как в недорогом бытовом навигаторе:

$$\sigma_X = \sigma_Z = 10 \text{ м}, \quad \sigma_Y = 20 \text{ м}, \quad \sigma_\Psi = \sigma_\theta = \sigma_\gamma = 1^\circ. \quad (17)$$

Нормально распределённые ошибки НС моделируются с помощью известного алгоритма Бокса-Мюллера. Важным фактором, влияющим на работу СКВ, являются частоты обновления информации в её подсистемах. Обновление изображения с СУВ производится с частотой в 25 Гц, что соответствует частоте работы большинства реальных бортовых сенсоров. Для НС принятая частота работы гироскопов составляет 100 Гц, а частота работы ГНСС, измеряющей положение ЛА, составляет 10 Гц, что также соответствует реальным частотам измерений в НС. Предполагается, что бортовые сенсоры СУВ расположены на идеальной стабилизирующей платформе, без вибраций и тряски, что очень близко к реальности, если размещать СУВ в тех местах фюзеляжа ЛА, где вибрации от работы его двигателей и других авиационных систем

минимальны. При этом СУВ принимает на вход модельные изображения размером 640×480 пикселей с полями зрения по горизонтали и вертикали 40° и 30° соответственно, сформированные по закону центрального проектирования с имитацией шумов, расфокусировки и погодных условий по таким параметрам как нижняя граница облачности (НГО) и метеорологическая дальность видимости (МДВ). В тестовых видеопоследовательностях использовалась одноканальная СУВ, имитирующая работу тепловизионной камеры спектрального диапазона э/м волн длиной 8-14 мкм при заходе самолёта на посадку [2, 11, 12]. Текстуры и ВММ соответствуют реальной местности вокруг реального аэродрома, выполненные в ходе аэрофотосъёмки и дистанционного зондирования местности.

Раздел «Получение комбинированного изображения» во второй главе посвящён анализу особенностей работы алгоритма 3D фильтрации. Для данной задачи комплексирования, формируемое комбинированное изображение рассматривается как трёхмерная функция

$$I(x, y, \lambda), \quad x = 1, 2, \dots, M, \quad y = 1, 2, \dots, N, \quad \lambda = \lambda_1, \lambda_2, \quad (18)$$

где x, y – элементы дискретизации пространства изображений размера $M \times N$, а λ – элементы дискретизации пространства источников их формирования. В нашем случае источников формирования тоже два: БОЭС (СУВ) – λ_1 и бортовой компьютер (СБВ) – λ_2 . Представление (18) сводит задачу синтеза комбинированного изображения к синтезу трёхмерного интерполирующего цифрового фильтра нижних частот (3D ФНЧ), область пропускания которого согласована с областью существования спектра результирующего изображения.

При отсутствии явных помех и шумов на изображениях от СУВ предлагается модификация алгоритма 3D фильтрации «взвешенное усреднение», позволяющая получать более детальные и контрастные комбинированные изображения. Для СКВ этот случай, как правило, имеет место, так как синтезированное изображение формируется бортовым вычислителем и потому практически не содержит шумов и помех, а изображения в современных СУВ часто уже проходят предварительную обработку. В случае же изображений с помехами и шумами, согласно проведённому исследованию [3, 10], наиболее эффективным способом комплексирования остаётся исходный алгоритм 3D фильтрации. Модификация заключается в вырождении двумерных фильтрующих звеньев исходного 3D фильтра в тождественные с неограниченной

областью пропускания, в силу предположения об отсутствии помех и шумов. В результате известный 3D фильтр вырождается в одномерный фильтр – взвешенное усреднение. В терминах представления (18) он записывается следующим образом:

$$I(x, y, \lambda) = I_{\text{сенсор}}(x, y) + 0,5 * I_{\text{синтез}}(x, y), x = 1, 2, \dots, M, y = 1, 2, \dots, N, \quad (19)$$

В третьей главе «Программная реализация для исследования и апробации алгоритмов» описаны основные технические моменты, связанные с реализацией предложенных алгоритмов при моделировании работы авиационной СКВ. Предлагаемые алгоритмы совмещения и комплексирования реализованы в оконном WPF-приложении на языке C# с применением графической библиотеки OpenTK. Реализация включает в себя моделирование работы бортовых СУВ, ССВ и НС в соответствии со сделанными допущениями. На рисунке 3а представлен пример работы алгоритмов во время имитации посадки самолёта на аэродром при слабой видимости.

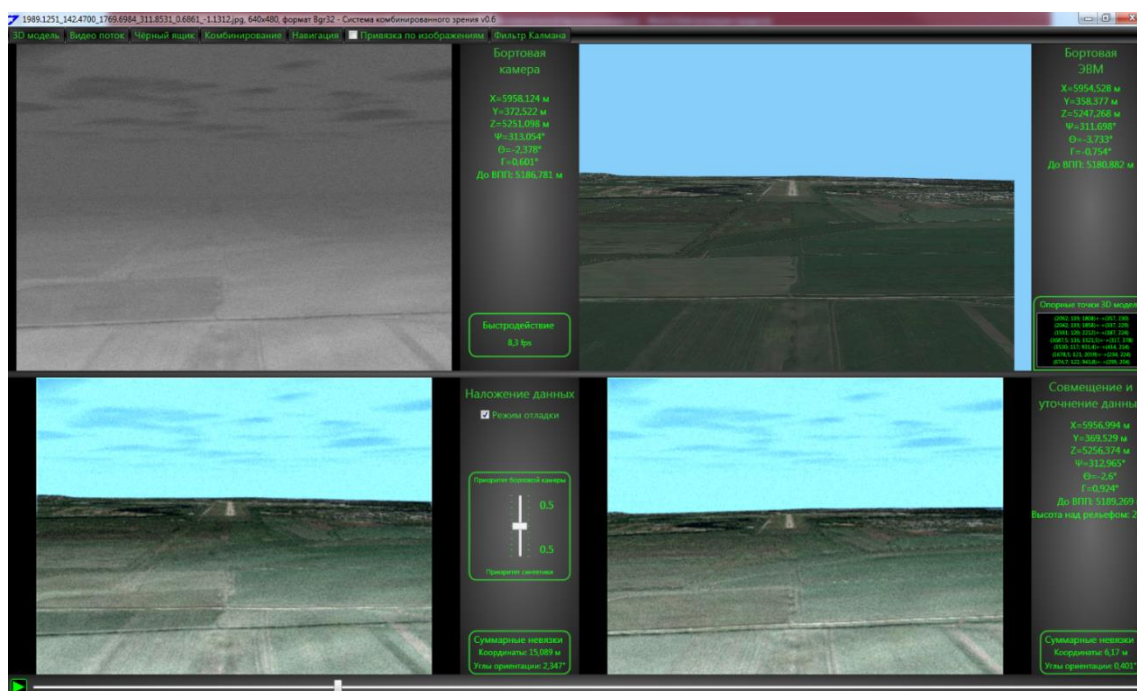


Рисунок 3а. Моделирование посадки в сложных условиях. Вверху: слева – кадр СУВ, справа – кадр ССВ; внизу: слева – наложение без совмещения, справа – наложение с совмещением

Здесь изображение от СУВ недостаточно информативно для его использования в алгоритме совмещения, поэтому совмещение производится с помощью формирования нового синтезированного кадра по ракурсу, уточнённого с помощью фильтрации по Калману. В случае достаточно информативных изображений от СУВ и ССВ, возможно использовать информацию об их деталях для их совмещения (см. рисунок 3б).

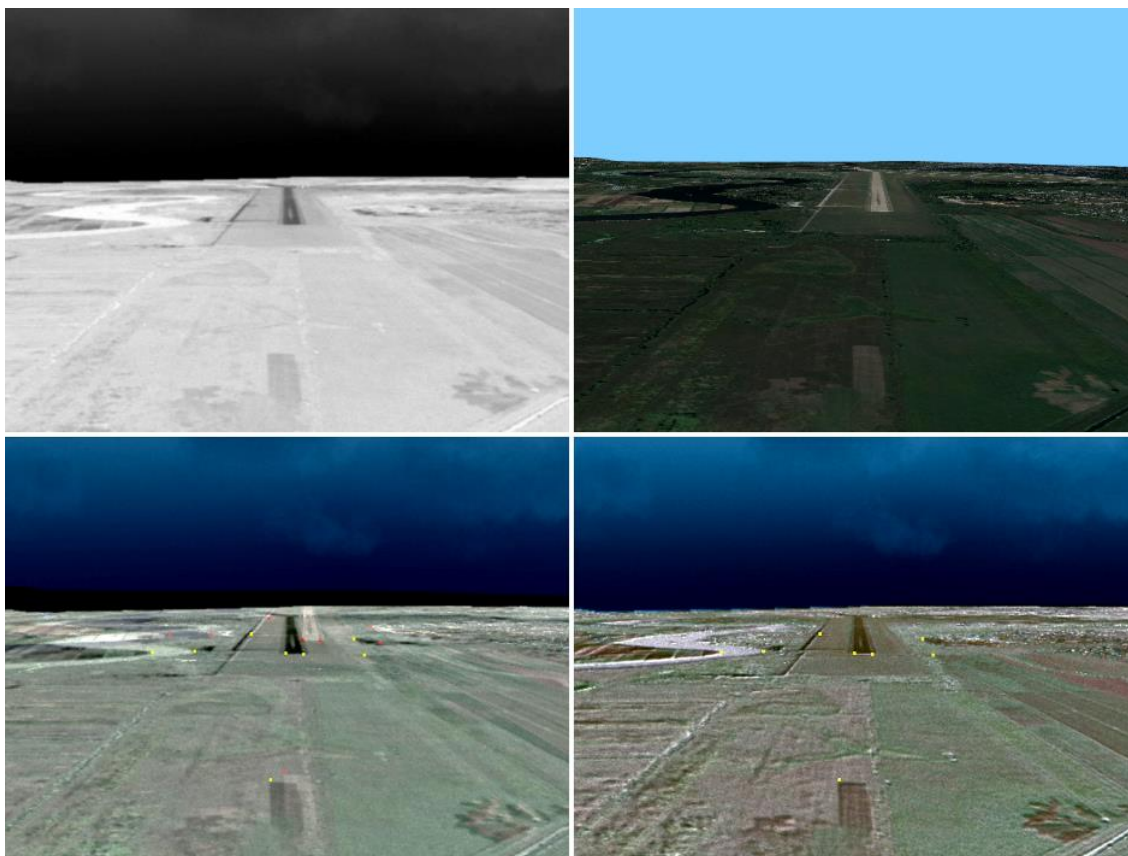


Рисунок 36. Работа алгоритма совмещения при возможности распознавания соответствий.
Точками выделены центры ТО, по которым выполняется совмещение

В четвёртой главе «Экспериментальная оценка качества работы алгоритмов» предложены методы оценки качества работы исследуемых алгоритмов совмещения и комплексирования изображений.

Качество работы любого метода совмещения изображений характеризуется мерой отклонения между соответствующими деталями совмещённых изображений, а также его устойчивостью во время работы. Согласно требованиям документов Р-315 и DO-315В, регламентирующих допустимую точность совмещения изображений в СКВ, в общем виде формула расчёта максимально допустимого отклонения Δ_{pix} между соответствующими особенностями в пикселях изображения имеет вид:

$$\Delta_{pix} = 0,005 \sqrt{\left(\frac{w}{\alpha_x}\right)^2 + \left(\frac{h}{\alpha_y}\right)^2}, \quad (20)$$

где α_x и α_y – угловые разрешения полей зрения изображения в радианах по его ширине и высоте соответственно, w и h – ширина и высота текущего изображения в пикселях соответственно.

При заданных параметрах моделирования СУВ и ССВ формируют изображения

размером 640×480 квадратных пикселей с полями зрения $40^\circ \times 30^\circ$. При пересчёте радиан в градусы имеем: $5 \text{ мрад} = \frac{180^\circ}{\pi} 0,005 \cong 0,286^\circ$. В данном случае угловые разрешения, как по горизонтали, так и по вертикали одинаковы. Поэтому допустимая величина расхождения между соответствующими деталями по горизонтали r_1 и вертикали r_2 не должна превышать 4,576 пикселя в окрестности геометрического центра изображения:

$$r_1 = r_2 < \left(\frac{0,286^\circ}{40^\circ} \times 640 \text{ пикс.} \right) = 4,576 \text{ пикс.} \quad (21)$$

Тогда согласно (20), оценка точности совмещения должна удовлетворять условию:

$$R = \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \leq 4,576\sqrt{2} \cong 6,5 \text{ пикс.} \quad (22)$$

В окрестности геометрического центра изображения (в направлении расчётного взгляда пилота) величина отклонения между соответствующими ТО минимальна из-за минимальных искажений БОЭС и малости ошибок НС по сравнению с угловыми размерами совмещаемых изображений, что также зависит от точности соответствия используемой ВММ реальной местности. Погрешности при создании ВММ предлагаемый способ не учитывает, так как неточности ВММ обычно вносят существенно меньший вклад в рассогласование кадров, чем ошибки НС ЛА. Поэтому для каждой пары совмещённых кадров производится оценка минимальной величины расхождения между соответствующими особенностями.

На рисунке 4 приведён график оценки в динамике величины минимального по каждому кадру комбинированного видеопотока расхождения между соответствующими особенностями для заданных условием (17) погрешностей НС при наложении кадров без совмещения (серая линия), совмещении без фильтрации по Калману (голубая линия) и совмещении с последующей фильтрацией (красная линия):

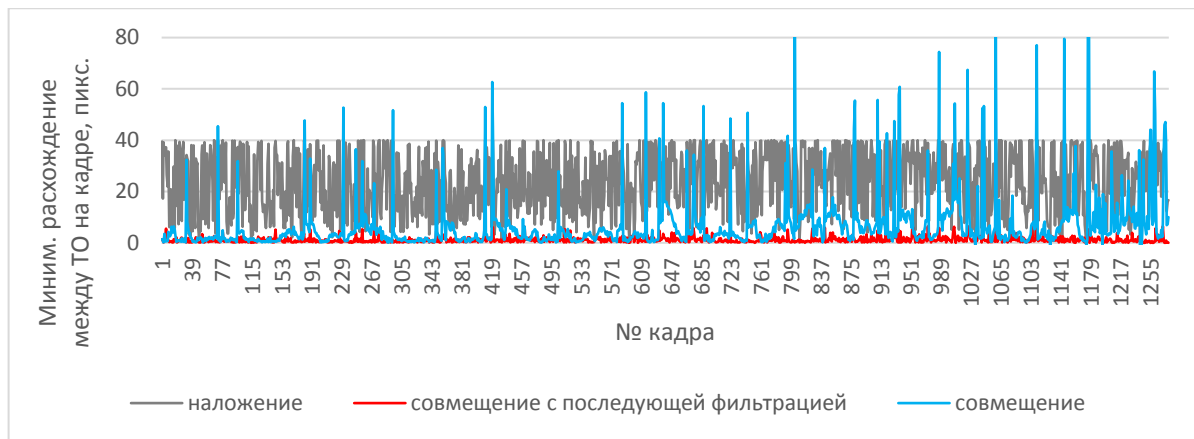


Рисунок 4. Результаты оценки качества совмещения в динамике при различных режимах совмещения

Из рисунка 4 видно, что предлагаемый метод совмещения без фильтрации даёт сильные выбросы, связанные с ошибками распознавания ТО (голубая линия). Последующая Калмановская фильтрация уточнённых параметров внешнего ориентирования (см. рисунок 5) существенно сглаживает данные выбросы (красная линия): ошибка совмещения в динамике не превышает 6,5 пикселей, что отвечает условию (22) и соответственно требованиям Р-315 и DO-315В по точности совмещения. Также из рисунка 5 следует, что необходимо делать вывод о качестве работы метода совмещения, исходя из наихудших его результатов в динамике на протяжении всего этапа полёта (проверка на устойчивость).

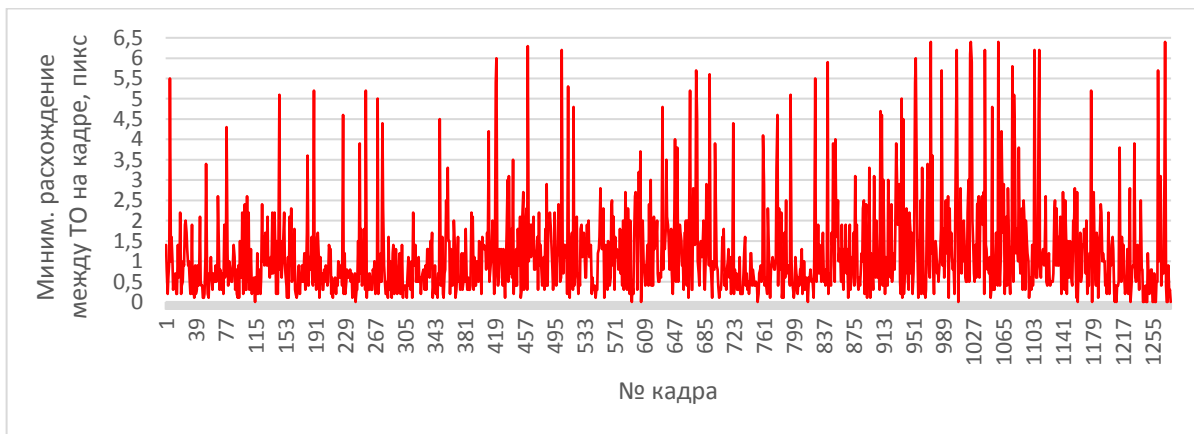


Рисунок 5. Результаты оценки качества совмещения в динамике при совмещении кадров с последующей фильтрацией

Известные методы оценки комбинированных изображений слабо учитывают реально воспринимаемые пилотом (оператором) информационные признаки. Поэтому была разработана новая концепция оценки информативности таких изображений. На её основе предложен алгоритм, позволяющий оценивать результативность применения методов комплексирования.

Изображения содержат информацию об объектах наблюдаемого пространства, которые наделены определёнными спектрально-энергетическими признаками (СЭП) и пространственными признаками (ПП), изменяющимися во времени [3, 10]. Это в первую очередь ПП ($R_{ПП}$) объектов, а также СЭП ($R_{СЭП}$), роль которых заключается в привлечении дополнительных признаков, позволяющих осуществить различение новых объектов в данном комбинированном изображении. При этом следует дополнительно оценивать реалистичность восприятия данных признаков ($R_{РВ}$), выражающей меру сохранения распределений яркости исходной информации. Учитывая одновременно данные факторы, предлагается оценивать общее количество различаемой информации $V_{Общ}$ в виде произведения:

$$V_{Общ} = \begin{cases} R_{ПП}R_{СЭП}R_{РВ}, & \text{если } R_{СЭП} > 0 \text{ и } R_{РВ} > 0, \\ -|R_{ПП}R_{СЭП}R_{РВ}|, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (23)$$

Геометрически формула (23) выражает объём совокупной различаемой информации на комбинированном изображении. Величина объёма определяет меру информативности. Знак объёма за счёт значений $R_{СЭП}$ и $R_{РВ}$ означает истинность или ложность восприятия информации на комбинированном изображении по отношению к его составляющим. Детальность $R_{ПП}$ как мера числа различимых деталей на изображениях всегда неотрицательна. Таким образом, комбинированное изображение должно иметь высокую детальность синтезированных изображений, спектральные контрасты сенсорных изображений и при этом сохранять общее распределение яркостей по отношению к его составляющим.

Детальность изображения характеризуется наличием различимых границ объектов на некотором фоне, представляющих собой протяжённые перепады яркости. Для цифрового монохромного комбинированного изображения I_C с размерами $M \times N$ элементов относительное сохранение деталей формально можно описать в виде функции от отношения модулей градиентов комбинированного изображения к максимуму от модулей градиентов его составляющих I_1 и I_2 :

$$R_{ПП} = \frac{1}{(M-2)(N-2)} \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} \delta(x, y), \quad (24)$$

где $\delta(x, y)$ – функция различимости деталей комбинированного изображения в точке (x, y) :

$$\delta(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{\partial I_C}{\max(\partial I_1, \partial I_2)} > T_0 \text{ и } \max(\partial I_1, \partial I_2) > 0, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (25)$$

где $\partial I_j = \partial I_j(x, y), j \in \{1, 2, C\}$ – модули градиентов соответствующих изображений в точке (x, y) , для их вычисления используется известный оператор Собеля. T_0 – порог различимости границ объектов для комбинированных изображений. Из (25) следует, что $0 \leq \frac{\partial I_C}{\max(\partial I_1, \partial I_2)} \leq 1$, тогда $0 \leq T_0 \leq 1$. Так как понятие различимости в итоге должно быть согласовано с визуальным восприятием, то величину порога различимости T_0 следует находить эмпирически на основании усреднённых субъективных оценок. Должную согласованность обеспечивает значение порога $T_0 = 0,25$. Согласно (24 - 25), $R_{\text{ПП}}$ изменяется в пределах от 0 (нет различимых деталей) до 1 (полное сохранение деталей от двух комплексируемых каналов). Если при комплексировании хотя бы одно из изображений цветное, то выбирается суммарное значение $R_{\text{ПП}}$ по всем цветовым каналам.

Для оценки спектрального (сенсорного) контраста сцены $R_{\text{СЭП}}$ по сенсорному изображению проходят центральным скользящим окном размером $(2k + 1) \times (2k + 1)$ элементов и находят области с самой высокой и самой низкой энергетикой (яркостью). Найденные области в комбинированных изображениях учитываются при расчёте контраста:

$$R_{\text{СЭП}} = \begin{cases} \frac{K_C}{K_{\text{Сенс}}}, & \left| \frac{K_C}{K_{\text{Сенс}}} \right| < 1, \\ 1, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (26)$$

$$K_C = \frac{H_C - L_C}{H_C + L_C}, \quad K_{\text{ТПВ}} = \frac{H_{\text{Сенс}} - L_{\text{Сенс}}}{H_{\text{Сенс}} + L_{\text{Сенс}}}, \quad (27)$$

где K_C и $K_{\text{Сенс}}$ – относительные сенсорные контрасты для комбинированного и сенсорного изображения, H_C и $H_{\text{Сенс}}$ – усреднённые значения яркости в самой яркой области сцены для комбинированного и сенсорного изображения, L_C и $L_{\text{Сенс}}$ – усреднённые значения яркости в самой тёмной области сцены для комбинированного и сенсорного изображения. Размер областей 21×21 пикселей ($k = 10$) выбирался так, чтобы контрасты были достаточно локальными, и в то же время шумы, помехи и ложные контура не вносили существенного вклада в общую оценку сенсорного контраста. При комплексировании цветных изображений выбирается минимальное

значение $R_{СЭП}$ по всем цветовым каналам. Контраст на комбинированном изображении в виде отношения $\frac{K_C}{K_{Сенс}}$ может быть меньше 0, тогда сенсорный канал не добавляет никакой полезной различительной информации по СЭП и такой вариант комплексирования следует считать неудачным. Случай $\left| \frac{K_C}{K_{Сенс}} \right| > 1$ соответствует усилению исходного относительного контраста $K_{Сенс}$ на комбинированном изображении и, следовательно, не добавляет информационных признаков. Поэтому оценка $R_{СЭП}$ выбрана так, чтобы $|R_{СЭП}| \leq 1$.

Реалистичность восприятия $R_{РВ}$ можно определить, как произведение коэффициентов корреляции $\rho(I_1, I_C)$ и $\rho(I_2, I_C)$ яркости пикселей комбинированного изображения I_C с его составляющими I_1 и I_2 :

$$R_{РВ} = \rho(I_1, I_C)\rho(I_2, I_C) \in [-1, 1], \quad (28)$$

$$\rho(I_j, I_C) = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_j[x, y] - \overline{I_j[x, y]})(I_C[x, y] - \overline{I_C[x, y]})}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_j[x, y] - \overline{I_j[x, y]})^2 \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I_C[x, y] - \overline{I_C[x, y]})^2}},$$

$$j \in \{1, 2\}, \quad (29)$$

$$\overline{I_t[x, y]} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} I_t[x, y], \quad t \in \{1, 2, C\}, \quad (30)$$

где M и N - размеры изображений в пикселях. Для цветных изображений выбирается минимальное значение $R_{РВ}$ по всем цветовым каналам.

Согласно формулам (24 - 30), $-1 \leq V_{Общ} \leq 1$. Случай $V_{Общ} < 0$ можно трактовать как мнимый объём или как ложную (искажённую) информацию. Методы комплексирования, приводящие к значениям $V_{Общ} \leq 0$, следует также считать неудачными и в дальнейшем исключать из рассмотрения. Равенство $V_{Общ} = 1$ соответствует теоретическому пределу – полному сохранению различительной информации на комбинированном изображении от его составляющих. Равенство $V_{Общ} = 0$ соответствует полной потере хотя бы одного из базисных информационных признаков при комплексировании.

При сравнении 15-ти различных методов комплексирования изображений использовалось 4 пары предварительно обработанных синтезированных цветных и сенсорных цветных и монохромных изображений, полученных при виртуальных заходах самолёта на посадку в разных условиях. Предложенный метод оценки

информативности сравнивался с двумя из ныне распространённых методов оценки комбинированных изображений, как численно, так и визуально, что позволило наглядно показать бóльшую объективность предлагаемого алгоритма [3].

Лучшие результаты по информативности показали метод взвешенного усреднения и модифицированный метод оценки информативности. Тем не менее, именно взвешенное усреднение рекомендуется для комплексирования предварительно обработанных изображений в авиационной СКВ, так как данный метод проще в реализации и вычислительно эффективнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан алгоритм совмещения изображений местности, полученных с бортовых сенсоров воздушного судна, с искусственно сформированными проекциями по её ВММ. Он использует модель формирования синтезированных изображений с априорно известными на ней центрами ТО, что обеспечивает отсутствие артефактов искажения, связанных с геометрическими преобразованиями цифровых изображений, универсальность применения – работоспособность на произвольных сюжетах, приемлемую точность совмещения и быстрдействие, а также уточнение параметров внешнего ориентирования воздушного судна в пределах погрешностей его НС.

2. Разработан алгоритм оценки информативности комбинированных изображений, как мера сохранения трёх базисных информационных признаков пары комплексированных изображений: детальность, спектральные контрасты и реалистичность восприятия. Метод согласован с визуальной экспертной оценкой, так как основан на учёте реальных информационных признаков изображений.

3. Обосновано новое применение известного [3] метода трёхмерной фильтрации для комплексирования сенсорных и синтезированных изображений и предложена его модификация «взвешенное усреднение» для комплексирования незашумлённых сенсорных и синтезированных изображений, дающая более информативный результат по детальности. Согласно предложенному методу оценки информативности комбинированных изображений, взвешенное усреднение показало лучший результат и рекомендуется для комплексирования сенсорных и искусственных изображений.

Рассматриваемые алгоритмы проверялись на модельных данных. Тем не менее, при проверке предлагаемого алгоритма совмещения на соответствие минимальным

требованиям использовались точностные характеристики на уровне бытовых навигационных приборов, что говорит о возможности его использования в недорогих и компактных пользовательских системах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. *Бондаренко, М. А.* Алгоритм автоматического совмещения сенсорной и синтезируемой видеоинформации для авиационной системы комбинированного видения [Текст] / *Лебедев, М. А., Бондаренко, М. А., Комаров, Д. В., Степаньяни, Д. Г., Выголов, О. В., Визильтер, Ю. В., Желтов, С. Ю.* // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – № 7. – С. 8–13.
2. *Бондаренко, М. А.* Алгоритм совмещения сенсорной и синтезированной видеоинформации в авиационной системе комбинированного видения [Текст] // Кибернетика и программирование. – 2016. – № 1. – С. 236–257. DOI: 10.7256/2306-4196.2016.1.17770. URL: http://e-notabene.ru/kp/article_17770.html (дата обращения 11.03.2016).
3. *Бондаренко, М. А., Дрынкин, В. Н.* Оценка информативности комбинированных изображений в мультиспектральных системах технического зрения [Текст] // Программные системы и вычислительные методы. – 2016. – № 1. – С. 64–79. DOI: 10.7256/2305-6061.2016.1.18047

Публикации в рецензируемых изданиях

4. *Бондаренко, М. А.* Система навигации мобильной техники по глобальной трёхмерной модели местности [Текст] // Техническое зрение. – 2013. – Вып. 3 (3). – С. 41–49. URL: <http://magazine.technicalvision.ru/navigation-system-of-mobile-equipment-by-using-a-global-3d-environment-model/> (дата обращения 11.03.2016).
5. *Бондаренко, М. А.* Пространственно-временная фильтрация движущихся изображений [Текст] / *Бондаренко, А. В., Докучаев, И. В., Ядчук, К. А., Бондаренко, М. А., Дрынкин, Н. В.* // Техническое зрение. – 2014. – Вып. 1 (5). – С. 32–38. URL: <http://magazine.technicalvision.ru/spatio-temporal-filtering-of-moving-images/> (дата обращения 11.03.2016).
6. *Бондаренко, М. А., Павлов, Ю. В.* Способ получения на летательном аппарате (ЛА) улучшенного изображения подстилающей поверхности. Патент RU 2591029 С1; заявлен 13.02.2015; опубликован 17.06.2016, бюллетень № 19. [Электронный

ресурс]. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/259/2591029.html> (дата обращения 17.10.2016).

Публикации в сборниках трудов профильных конференций

7. *Бондаренко, М. А.* Аппаратная реализация бортовой автономной системы улучшенного и синтезированного зрения мобильной техники [Текст] / *Бондаренко, А. В., Бондаренко, М. А., Докучаев, И. В.* // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2012» / под ред. Р. Р. Назирова. – М.: Механика, управление и информатика, 2012. – С. 95–103.
8. *Бондаренко, М. А.* Аппаратная реализация трёхмерного фильтра [Текст] / *Бондаренко, А. В., Докучаев, И. В., Дрынкин, В. Н., Царева, Т. И., Бондаренко, М. А.* // Тезисы докладов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2013». – М.: ИКИ РАН, 2013. – С. 4–6. URL: http://tvcs2013.technicalvision.ru/docs/2013_v4.pdf (дата обращения 31.03.2016).
9. *Бондаренко, М. А.* Система навигации мобильной техники по глобальной трёхмерной модели местности [Текст] // Сборник трудов научной конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование» / под ред. В.А. Сухомлина. – М.: МГУ, 2013. – Т. 1. – С. 689.
10. *Бондаренко, М. А., Дрынкин, В. Н.* Повышение информативности изображений в бортовых системах усиленного видения [Текст] // Тезисы докладов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2015». – М.: ИКИ РАН, 2015. – С. 47. URL: http://tvcs2015.technicalvision.ru/docs/Сборник_тезисов_ТЗСУ_2015.pdf (дата обращения 31.03.2016).
11. *Бондаренко, М. А., Набоков, С. А., Павлов, Ю. В.* Алгоритм совмещения видеоинформации в авиационной системе комбинированного видения и его программная реализация [Текст] // Тезисы докладов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления – 2015». – М.: ИКИ РАН, 2015. – С. 45–46. URL: http://tvcs2015.technicalvision.ru/docs/Сборник_тезисов_ТЗСУ_2015.pdf (дата обращения 31.03.2016).
12. *Бондаренко, М. А., Набоков, С. А., Павлов, Ю. В.* Алгоритм совмещения видеоинформации в авиационной системе комбинированного видения [Текст] // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». – М.: 2015. – С. 136–139.