

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932.72

БОРИСКЕВИЧ
Илья Анатольевич

**ПОИСК ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ
КОВАРИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики

Минск 2015

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Цветков Виктор Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сети и устройства телекоммуникаций» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Сидоренко Алевтина Васильевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий Белорусского государственного университета

Прокопович Григорий Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования самоорганизующихся систем государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится « 8 » октября 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.04 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 1 » сентября 2015 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

П.Ю. Бранцевич

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсивного развития систем дистанционного видеомониторинга на базе беспилотных авиационных комплексов (БАК) актуальной проблемой является разработка эффективных методов и алгоритмов поиска объектов на кадрах видеопотока, передаваемого с борта легкого беспилотного летательного аппарата (БЛА). Особенностью видеомониторинга на базе легких БЛА является относительно малый размер сопровождаемых объектов, нестационарность видеокамеры, необходимость обработки изображений в реальном масштабе времени, низкое качество видеоизображения, обусловленное малой полосой канала передачи и простотой бортовых средств кодирования видеоданных, что накладывает дополнительные ограничения на применяемые методы и алгоритмы поиска объектов. Наиболее эффективным для поиска малоразмерных объектов является ковариационный метод. Однако в условиях видеомониторинга на базе легких БЛА данный метод имеет высокую вычислительную сложность, высокую чувствительность к шуму и снижению контраста видеоизображения, низкую точность локализации объектов. Для повышения эффективности ковариационного метода в рассматриваемых условиях необходимо решить задачи повышения устойчивости ковариационного дескриптора и стабилизации видеоизображения.

В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных методов и алгоритмов поиска малоразмерных объектов и стабилизации видеоизображения в условиях нестационарности видеокамеры бортового оптико-электронного модуля БЛА с учетом яркостно-контрастных и пространственно-временных характеристик аэроизображений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема диссертации соответствует пункту 5.4 «Математические и интеллектуальные методы, информационные технологии и системы распознавания и обработки образов, сигналов, речи и мультимедийной информации» перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585.

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских работ кафедры сетей и устройств телекоммуникаций учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Исследования по теме диссертационной работы проводились в соответствии с заданиями тем и хозяйственных договоров:

1. Разработка методов обработки, передачи и распределения мультимедийной информации, ГБ 06-2033, № ГР 200797, 2006–2010 гг.

2. Разработка и исследование методов и технологий построения мультисервисных локальных мобильных сетей, ГБ 11-2033, № ГР 20121437, 2011–2015 гг.

3. Разработать методы, алгоритмы и программные средства обнаружения объектов и определения их координат на кадрах видеопоследовательности с борта беспилотного летательного аппарата, задание 1.5.13 подпрограммы «Информатика», хд №13-1188Б, № ГР 100363945, 2013–2014 гг.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке методов и алгоритмов поиска малоразмерных объектов и стабилизации видеоизображения в условиях нестационарности видеокамеры бортового оптико-электронного модуля БЛА с учетом яркостно-контрастных и пространственно-временных характеристик аэроизображений.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

- проведение анализа методов пространственно-частотного поиска объектов;

- разработка методов поиска малоразмерных объектов, обеспечивающих их эффективное сопровождение на каждом кадре видеопоследовательности в реальном масштабе времени;

- разработка методов стабилизации видеоизображения, обеспечивающих устойчивое сопровождение малоразмерных объектов в реальном масштабе времени.

Научная новизна

1. Увеличение быстродействия поиска объектов в условиях неустойчивости видеокамеры в 6,2 раза и повышение вероятности правильного обнаружения на 10,2 % по сравнению с известным ковариационным методом.

2. Повышение быстродействия поиска малоразмерных объектов с 7,2 до 8,3 раза, вероятности правильного обнаружения с 13,9 до 15,5 %, устойчивости к зашумлению в среднем на 10,7 % и к изменению яркостно-контрастных характеристик видеопоследовательности в среднем на 4,4 % по сравнению с ковариационным методом.

3. Уменьшение времени поиска реперных областей в 5,2 раза по сравнению

с методом SURF (Speeded-Up Robust Features – ускоренные устойчивые признаки) и повышение устойчивости стабилизации видеоизображения до 16 раз в условиях зашумления и до 11,5 раза в условиях изменения его яркостно-контрастных характеристик.

4. Уменьшение времени поиска реперных областей до 1,8 раза по сравнению с методом SURF, повышение устойчивости стабилизации видеоизображения к зашумлению (дисперсия гауссова шума 0,05...0,5) до 18 раз и к изменению его яркостно-контрастных характеристик (коэффициент коррекции контраста 1...5) до 8,1 раза.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм селективно-ковариационного пространственного поиска малоразмерных объектов, основанный на взаимосвязи ковариационных признаков, пространственно-временном предсказании параметров области поиска и расстоянии Римана;

2. Метод пространственно-частотного ковариационного поиска малоразмерных объектов, основанный на пространственно-частотных свойствах поддиапазонов коэффициентов непрореженного лифтинг вейвлет-преобразования (ЛВП) и взаимосвязи ковариационных вейвлет-признаков;

3. Алгоритм ковариационной стабилизации видеоизображения, основанный на взаимосвязи ковариационных вейвлет-признаков и последовательной коррекции положения реперных областей между соседними видеокадрами;

4. Метод адаптивной ковариационной стабилизации видеоизображения, основанный на взаимосвязи пространственных ковариационных признаков и селективно-блочном поиске реперных областей между соседними видеокадрами.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты и положения диссертации, выносимые на защиту, разработаны и получены лично автором. В работах, которые выполнены в соавторстве, личный вклад автора определяется рамками изложенных в диссертации результатов.

Основным соавтором опубликованных работ является научный руководитель канд. техн. наук, доцент В.Ю. Цветков, вклад которого связан с определением цели и задач исследований, выбором методов исследований, интерпретацией и обобщением результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались

и обсуждались на Международной научной конференции «Россия – Беларусь – Сколково: единое инновационное пространство» (Минск, Беларусь, 2012 г.); X Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, Беларусь, 2012 г.); Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, Украина, 2012 г., 2013 г.); Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, Беларусь, 2014 г.); IV Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (Минск, Беларусь, 2014); Международном научно-техническом семинаре «Телекоммуникации: Сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, Беларусь, 2013 г., 2014 г.).

Использование и применение результатов диссертации подтверждено актами об использовании в учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и в беспилотных авиационных комплексах, производимых НПЦ «Беспилотные авиационные комплексы и технологии» ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси».

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах (общим объемом 2,1 авторского листа), 9 статей и тезисов в сборниках и материалах конференций. Получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и шести приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 130 страниц, из них 69 страниц текста, 45 рисунков на 37 страницах, 3 таблицы на 3 страницах, библиографический список из 70 наименований на 6 страницах, список публикаций автора по теме диссертации из 14 наименований на 3 страницах, шесть приложений на 35 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введение** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения

исследований, связанных с разработкой методов и алгоритмов поиска малоразмерных объектов и стабилизации видеоизображения в условиях нестационарности видеокамеры бортового оптико-электронного модуля БЛА с учетом яркостно-контрастных и пространственно-временных характеристик аэроизображений.

В **первой главе** приведены результаты анализа современного состояния проблем поиска объектов и стабилизации видеоизображения. Показано, что ключевым компонентом методов поиска объектов являются дескрипторы, на основе которых производится поиск соответствия между эталонным образом объекта и текущим кадром видеопоследовательности. Сформулированы следующие основные требования к дескрипторам объектов: баланс между устойчивостью и точностью поиска, баланс между простыми и устойчивыми визуальными признаками, поиск в условиях понижения частоты видеокадров, обработка в реальном масштабе времени.

Показано, что наиболее эффективным для поиска малоразмерных объектов в условиях нестационарной видеокамеры является метод на основе интегрального ковариационного дескриптора. При использовании ковариационной матрицы в качестве дескриптора объекта осуществляется объединение низкоуровневых (пиксельные и локальные признаки) и среднеуровневых (признаки с учетом их пространственной взаимосвязи) признаков без их нормирования или использования весовых коэффициентов, обеспечивается инвариантность к масштабированию и изменению формы объекта и пространственно-частотная локализация объекта поиска. В связи с этим ковариационная матрица обладает высокой дискриминационной способностью, что позволяет использовать ее для поиска малоразмерных объектов посредством нестационарной видеокамеры в присутствии схожих объектов. Ограничением на практическое применение ковариационного метода является высокая вычислительная сложность, связанная с размером ковариационной матрицы и признаков изображений. Кроме того, недостатком ковариационного метода является резкое увеличение вероятности ложного обнаружения цели при повышении скорости движения объекта и видеокамеры, а также при увеличении уровня шума и снижении контраста аэроизображений.

Установлено, что увеличение быстродействия ковариационного метода возможно за счет адаптивного уменьшения области поиска объекта, а высокая устойчивость к шуму и изменению яркостно-контрастных характеристик может быть достигнута за счет использования пространственно-частотных вейвлет-признаков.

Показано, что при поиске объектов с борта легкого БЛА одной из важных задач является стабилизация видеоизображения. Вычисленные по реперным областям на соседних видеокадрах разностные смещения и углы ориентации видеокамеры могут быть использованы для повышения эффективности методов

поиска объектов, уточнения данных телеметрии и увеличения точности позиционирования БЛА.

Определено, что существующие методы градиентной параметризации и локализации реперов, такие как SIFT (Scale-Invariant Feature Transform – масштабно-инвариантное преобразование признаков) и SURF (Speeded-Up Robust Features – ускоренные устойчивые признаки) в случае обработки видеопоследовательности с борта легкого БЛА неэффективны из-за высокой чувствительности градиентного дескриптора к шуму. Кроме того, данные методы обладают высокой вычислительной сложностью и не могут быть применены для обработки аэроизображений в реальном масштабе времени.

Установлено, что повышение устойчивости стабилизации видеоизображения к шуму возможно за счет использования интегрального ковариационного дескриптора для реперных областей. При этом повышение быстродействия может быть достигнуто за счет предсказания положения реперных областей и использования селективно-блочного поиска в пределах предсказанной области.

Таким образом, для решения поставленных задач целесообразно использовать ковариационную обработку и лифтинг вейвлет-преобразование аэроизображений.

Во **второй** главе описаны разработанные алгоритм и метод поиска малоразмерных объектов на основе пространственно-частотной ковариационной обработки аэроизображений.

Для повышения эффективности сопровождения в условиях увеличения скорости движения объекта и видеокамеры, а также при пропадании объекта предложен алгоритм селективно-ковариационного пространственного поиска малоразмерных объектов, основанный на пространственно-временном предсказании местоположения и размера области поиска объекта и определении ее формы, ковариационном анализе окон-кандидатов и эталонного образа объекта. Сущность предложенного алгоритма заключается в формировании признаковых изображений для перекрывающихся окон-кандидатов в пределах предсказанной области поиска объекта на текущем кадре видеопоследовательности, вычислении ковариационных матриц признаковых изображений и их сравнении с матрицей эталонного образа объекта. Предложенный алгоритм отличается от известного ковариационного метода предсказанием местоположения и размера области поиска и определением ее формы, обработкой события отсутствия объекта на видеокadre. Пространственно-временное предсказание осуществляется на основе параметров движения объекта (скорость, ускорение, направление), определяемых по предыдущим кадрам видеопоследовательности, параметров движения видеокамеры (скорость, ускорение, направление) для текущего видеокadre относительно предыдущего, вероятности правильного обнаружения цели на предыдущих кадрах, экстремумов

гистограммы эталонного образа объекта.

Установлено, что алгоритм селективно-ковариационного пространственного поиска позволяет уменьшить время и повысить вероятность правильного обнаружения цели, а также сопровождать быстро движущиеся малоразмерные объекты (размером от 16 до 900 пикселей) за счет предсказания формы и минимизации размера области поиска. В случае понижения частоты кадров предложенный алгоритм позволяет повысить вероятность правильного обнаружения цели в среднем на 10,2 % в условиях сопровождения с высоты порядка 300 м (рисунок 1) и до 49 % в условиях сопровождения с высоты порядка 400 м. Предложенный алгоритм позволяет уменьшить время обработки кадров в 6,2 раза по сравнению со стандартным ковариационным методом.

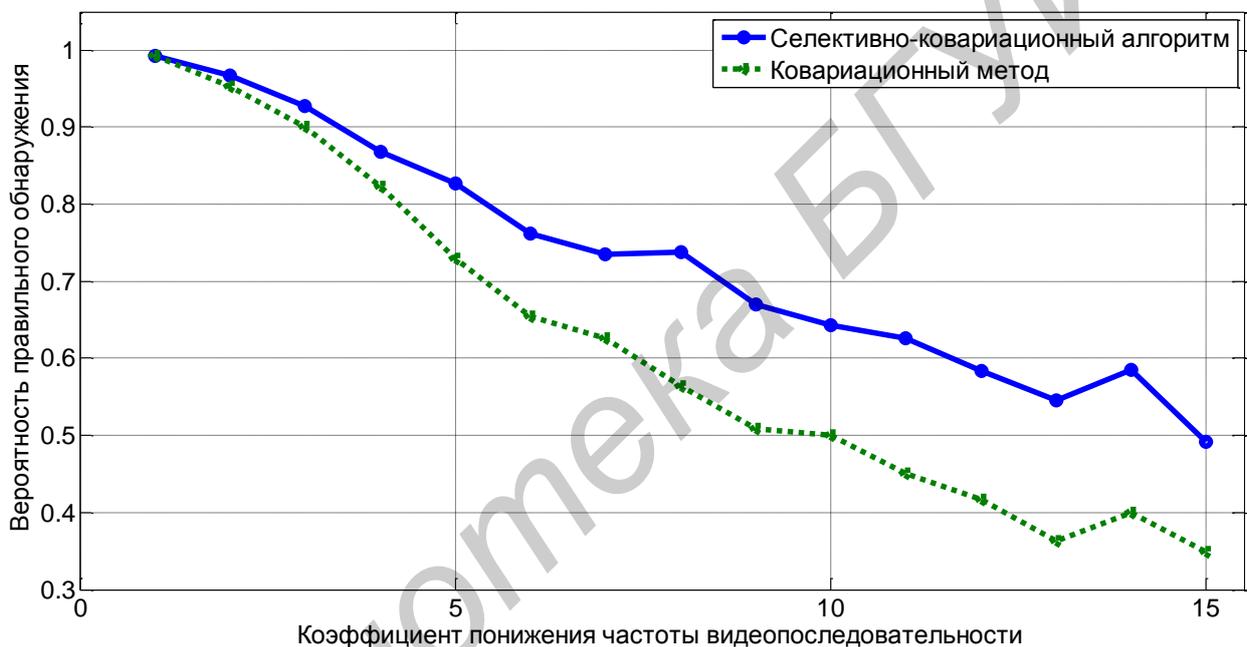
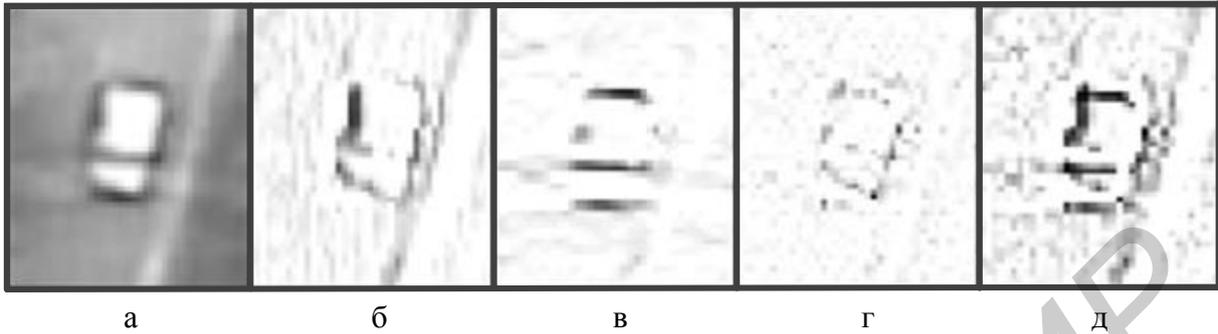


Рисунок 1. – Зависимость вероятности правильного обнаружения цели от величины коэффициента понижения частоты видеокадров

Для повышения устойчивости сопровождения (обеспечение требуемого значения вероятности правильного обнаружения цели) в условиях увеличения уровня шума и ухудшения яркостно-контрастных характеристик аэроизображений разработан метод пространственно-частотного ковариационного поиска малоразмерных объектов, основанный на вычислении непрореженного ЛВП Хаара. Сущность метода заключается в формировании признаков изображений для перекрывающихся окон-кандидатов в пределах области поиска объекта на текущем кадре видеопоследовательности, вычислении ковариационных матриц признаков изображений и их сравнении с матрицей эталона. В отличие от известного ковариационного метода предложенный метод использует пространственно-частотные свойства поддиапазонов аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов непрореженного ЛВП

Хаара в качестве признаков изображений для формирования интегрального ковариационного дескриптора (рисунок 2).



а – поддиапазон аппроксимирующих коэффициентов; б – поддиапазон вертикальных детализирующих коэффициентов; в – поддиапазон горизонтальных детализирующих коэффициентов; г – поддиапазон диагональных детализирующих коэффициентов; д – суммарное изображение трех поддиапазонов детализирующих коэффициентов

Рисунок 2. – Пространственно-частотные поддиапазоны одноуровневой матрицы непрореженного ЛВП Хаара фрагмента аэроизображения

Данный метод позволяет уменьшить время и вероятность ложного обнаружения цели, повысить устойчивость к шуму и изменению контраста видеопоследовательности за счет более эффективной пространственно-частотной локализации признаков сопровождаемого объекта. Определено, что в качестве признаков изображений целесообразно использовать следующие поддиапазоны коэффициентов первого уровня разложения непрореженного ЛВП Хаара: аппроксимирующие (LL), вертикальные (LH), горизонтальные (HL) и диагональные (HH) детализирующие, суммарные детализирующие (H).

Вычисление элементов пространственно-частотной ковариационной матрицы $C_l = (c_l(i, j) | i, j = \overline{1, 4})$ для l -го окна-кандидата осуществляется с помощью соотношения

$$c_l(i, j) = \frac{1}{UV} \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V (F_{l,i}(u, v) - \mu_{l,i})(F_{l,j}(u, v) - \mu_{l,j}), \quad (1)$$

где $F_{l,i(j)} = (F_{l,i(j)}(u, v))$ – i -й (или j -й) поддиапазон одноуровневой вейвлет-матрицы l -го окна-кандидата размером $U \times V$, состоящий из аппроксимирующих, детализирующих вертикальных, горизонтальных или диагональных коэффициентов $F_{l,i(j)}(u, v)$ непрореженного ЛВП Хаара; $\mu_{l,i}$ – среднее арифметическое i -го поддиапазона.

Установлено, что при понижении частоты кадров предложенный метод позволяет повысить вероятность правильного обнаружения цели на 15,5 % для интегрального ковариационного дескриптора на основе коэффициентов всех поддиапазонов первого уровня разложения непрореженного ЛВП Хаара, на

13,9 % – для аппроксимирующих и суммарных детализирующих коэффициентов и на 15,1 % – для аппроксимирующих и диагональных детализирующих коэффициентов. Определено, что по сравнению с известным ковариационным методом предложенный метод в среднем на 10,7 % более устойчив к зашумлению при использовании всех коэффициентов первого уровня разложения непрореженного ЛВП Хаара. При использовании аппроксимирующих и суммарных детализирующих коэффициентов устойчивость предложенного метода не отличается от ковариационного метода, при использовании аппроксимирующих и диагональных детализирующих коэффициентов – ухудшается по сравнению с известным методом. Установлено, что предложенный метод позволяет улучшить устойчивость к изменению яркостно-контрастных характеристик аэроизображений на 4,4 % по сравнению с известным методом при использовании всех коэффициентов первого уровня разложения непрореженного ЛВП Хаара, на 4,6 % – при использовании аппроксимирующих и суммарных детализирующих коэффициентов и на 5,3 % – при использовании аппроксимирующих и диагональных детализирующих коэффициентов (рисунок 3).

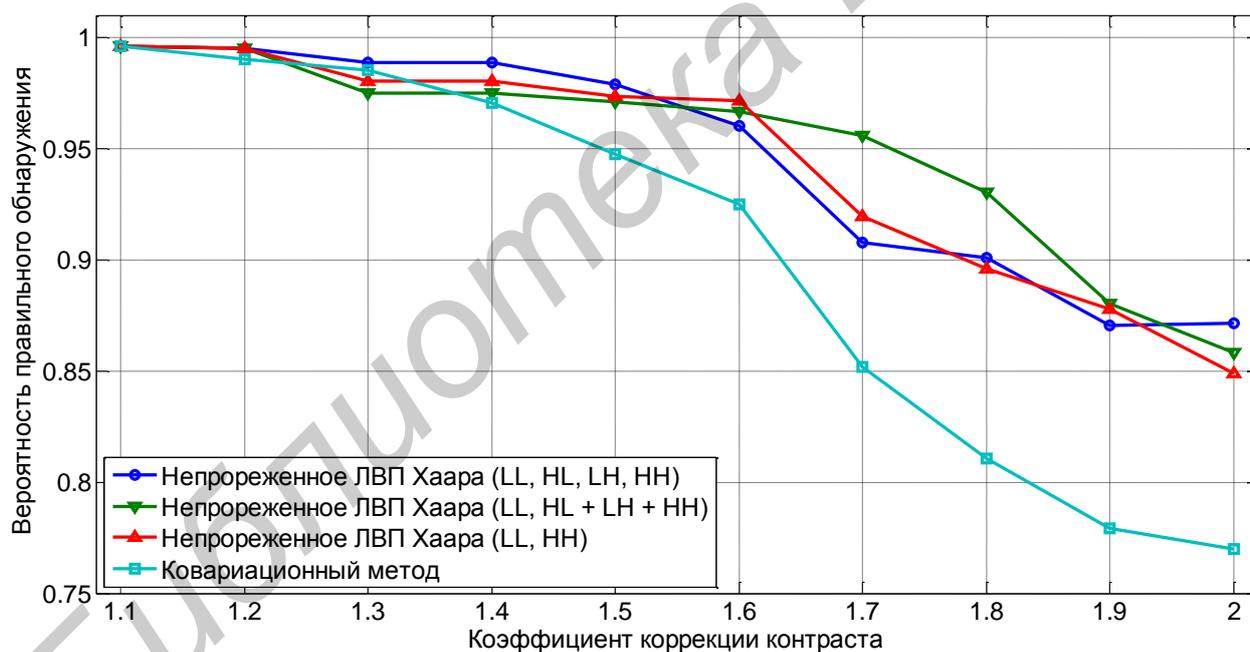


Рисунок 3. – Зависимость вероятности правильного обнаружения цели от величины коэффициента коррекции контраста аэроизображений

Среднее время обработки видеокadra при использовании модифицированного метода на основе коэффициентов всех поддиапазонов первого уровня разложения непрореженного ЛВП Хаара уменьшается в 7,2 раза, на основе коэффициентов аппроксимирующих и суммарных детализирующих поддиапазонов или на основе коэффициентов аппроксимирующих и диагональных детализирующих поддиапазонов – в 8,3 раза по сравнению с ковариационным методом.

Таким образом, для повышения устойчивости к зашумлению целесообразно формировать интегральный ковариационный дескриптор на основе поддиапазона аппроксимирующих и трех поддиапазонов детализирующих коэффициентов первого уровня разложения непрореженного ЛВП Хаара, а для увеличения быстродействия и повышения устойчивости к изменению яркостно-контрастных характеристик аэроизображений – на основе поддиапазона аппроксимирующих и суммарного поддиапазона детализирующих коэффициентов.

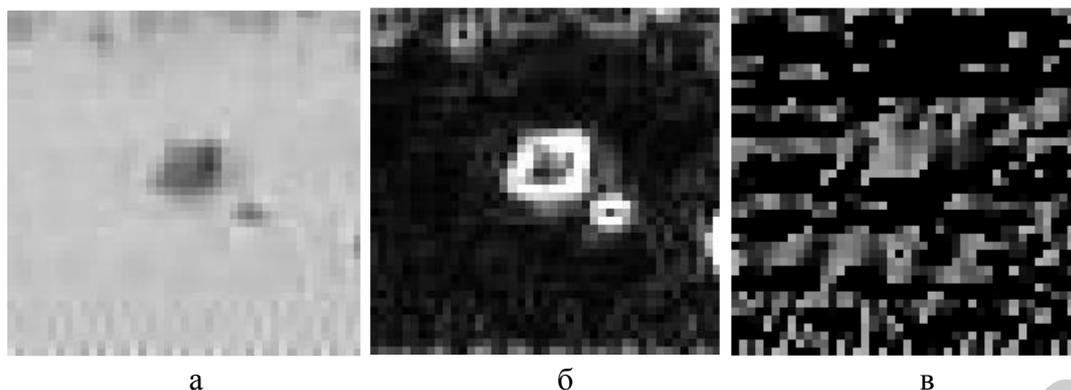
В **третьей главе** представлены разработанные алгоритм и метод стабилизации видеоизображения на основе пространственно-частотной ковариационной обработки аэроизображений и селективно-блочного поиска соответствий между градиентными ковариационными дескрипторами.

Для увеличения быстродействия и повышения устойчивости поиска реперных областей к шуму и изменению яркостно-контрастных характеристик разработан алгоритм ковариационной стабилизации видеоизображения с предсказанием, основанный на сопоставлении ковариационных вейвлет-признаков и последовательной коррекции положения реперных областей. Предложенный алгоритм по сравнению с алгоритмом на основе SURF позволяет снизить время поиска реперных областей за счет использования более компактного описания пространственно-частотных свойств реперных областей и последовательного уменьшения области поиска.

Установлено, что по сравнению с алгоритмом на основе SURF использование предложенного алгоритма позволяет уменьшить среднюю ошибку вычисления смещений между видеокадрами в условиях зашумления до 3,5 раза для высококонтрастных аэроизображений и до 16 раз для низкоконтрастных аэроизображений. Определено, что по сравнению с алгоритмом на основе SURF использование предложенного алгоритма позволяет уменьшить среднюю ошибку вычисления смещений между аэроизображениями при изменении яркостно-контрастных характеристик до 10 раз для аэроизображений высококонтрастного и до 11,5 раза для низкоконтрастного классов соответственно.

Использование дескриптора на основе прореженного ЛВП позволяет снизить время поиска реперных областей в 5,2 раза для высококонтрастных и в 2,8 раза для низкоконтрастных аэроизображений соответственно. Использование дескриптора на основе непрореженного ЛВП приводит к снижению времени вычислений в 1,2 раза для высококонтрастных и увеличению в 1,5 раза для низкоконтрастных аэроизображений.

Для увеличения быстродействия и повышения устойчивости в условиях низкого отношения сигнал – шум разработан метод адаптивной ковариационной стабилизации видеоизображения, основанный на градиентных ковариационных признаках (рисунок 4) и селективно-блочном поиске реперных областей.



а – исходная область изображения; б – изображение модулей градиента; в – изображение углов направлений градиента

Рисунок 4. – Градиентные признаковые изображения реперной области

Сущность метода заключается в адаптивном выборе параметров селективно-блочного поиска соответствия между динамическими окнами-кандидатами и эталонным образом реперной области.

Векторы скорости $\mathbf{v}_{kd}(n)$ и позиции $\mathbf{p}_{kd}(n)$ размерностью d k -го динамического окна-кандидата на n -й итерации вычисляются с помощью системы соотношений:

$$\mathbf{v}_{kd}(n) = w \cdot \mathbf{v}_{kd}(n-1) + c_1 \cdot (\hat{\mathbf{p}}_{kd}(n-1) - \mathbf{p}_{kd}(n-1)) + c_2 \cdot (\hat{\mathbf{p}}_{gd}(n-1) - \mathbf{p}_{kd}(n-1)), \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_{kd}(n) = \mathbf{p}_{kd}(n-1) + \mathbf{v}_{kd}(n), \quad (3)$$

где $\mathbf{p}_{kd}(n-1)$ – вектор позиции k -го динамического окна-кандидата на $n-1$ -й итерации; $\hat{\mathbf{p}}_{kd}(n-1)$ и $\hat{\mathbf{p}}_{gd}(n-1)$ – векторы наилучших индивидуальной и глобальной позиций k -го динамического окна-кандидата на $n-1$ -й итерации, определяемые с помощью сравнения ковариационных матриц окон-кандидатов и реперной области на основе расстояния Римана; c_1 и c_2 – коэффициенты ускорения индивидуального и глобального поведения окон-кандидатов, обеспечивающие повышение разнообразия распределения окон-кандидатов на начальных итерациях и повышение сходимости алгоритма на его конечных итерациях; w – коэффициент инерции движения, обеспечивающий оптимальное соотношение между индивидуальным и глобальным воздействиями на окна-кандидаты.

В процессе селективно-блочного поиска производится минимизация целевой функции на основе расстояния Римана:

$$\rho_{r,k}^2(C_r, C_{r,k}) = \sum_{i=1}^D \log^2 \lambda_i(C_r, C_{r,k}), \quad (4)$$

где $\lambda_i(C_r, C_{r,k})_{i=1, \overline{D}}$ – i -е собственное значение ковариационных матриц эталонного

образа r -й реперной области C_r и k -го динамического окна-кандидата $C_{r,k}$; D – количество признаков изображений.

Предложенный метод по сравнению с методом на основе SURF позволяет увеличить устойчивость в условиях низкого отношения сигнал – шум за счет использования градиентных признаков и уменьшить время вычислений за счет селективно-блочного поиска соответствия между интегральными ковариационными дескрипторами динамических окон-кандидатов и эталонного образа реперной области.

Использование предложенного метода по сравнению с методом стабилизации на основе SURF позволяет повысить устойчивость в случае сильного зашумления (дисперсия гауссова шума выше 0,12) до 16 раз для четырех динамических окон-кандидатов и трех итераций и до 18 раз для девяти динамических окон-кандидатов и трех итераций (таблица 1).

Таблица 1. – Оценка характеристик эффективности метода адаптивной ковариационной стабилизации для различного количества динамических окон-кандидатов K и итераций T

Параметры сравнения метода стабилизации на основе SURF и предложенного метода	Относительный выигрыш					
	$K = 4,$ $T = 2$	$K = 4,$ $T = 3$	$K = 4,$ $T = 4$	$K = 4,$ $T = 5$	$K = 9,$ $T = 2$	$K = 9,$ $T = 3$
Средняя ошибка вычисления смещения для дисперсии гауссова шума [0,05...0,5]	15,4	16	16,9	17,4	16,1	18
Средняя ошибка вычисления смещения для коэффициента контраста [1...5]	6,8	6,9	7,6	8,4	7,1	9
Время поиска реперных областей	1,8	1,2	-1,1	-1,3	-1,2	-1,8

Установлено, что по сравнению с методом стабилизации на основе SURF использование предложенного метода позволяет повысить устойчивость в случае значительного изменения яркостно-контрастных характеристик (коэффициент коррекции контраста выше 2,5) до 8,1 раза для видеок кадров высококонтрастного класса и до 9 раз для видеок кадров низкоконтрастного класса. Использование дескриптора на основе градиентных ковариационных признаков позволяет снизить время поиска реперных областей до 1,8 раза для четырех динамических окон-кандидатов и двух итераций. Однако при увеличении количества динамических окон-кандидатов или итераций селективно-блочного поиска время вычислений становится большим, чем для метода стабилизации на основе SURF. Это обусловлено высокой вычислительной сложностью градиентного дескриптора.

В четвертой главе приведена структурная схема программного комплекса сопровождения малоразмерной цели с предсказанием смещений аэроизображений по телеметрии БЛА (рисунок 5), основанная на предложенных методах и алгоритмах. Основными модулями программного комплекса являются следующие: модуль захвата, статической параметризации и определения местоположения цели, модуль предсказания местоположения цели, модуль поиска цели, модуль уточнения статических параметров и местоположения цели, модуль динамической параметризации цели.

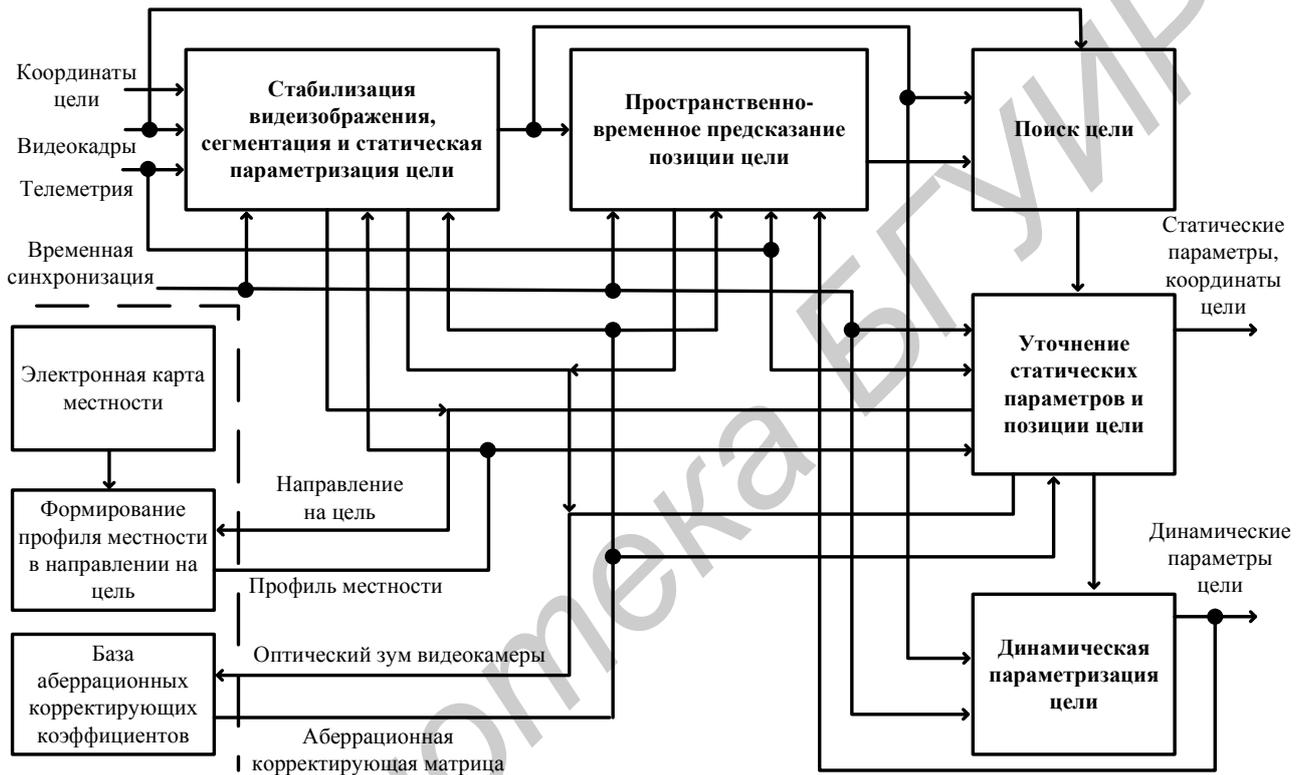


Рисунок 5. – Структура программного комплекса сопровождения малоразмерной цели с предсказанием по телеметрии

По результатам натурных испытаний определены основные факторы, оказывающие влияние на точность сопровождения малоразмерных объектов с БЛА с использованием разработанного программного комплекса. Установлено, что повышение вероятности правильного обнаружения цели возможно за счет использования цифровых способов формирования и передачи изображений, высокой кадровой частоты и высокого разрешения видеокамеры, большой битовой глубины видеокадра, стабилизации видеокамеры, повышения точности телеметрии (крен, тангаж и рыскание БЛА, крен и тангаж видеокамеры), повышения эффективности методов и алгоритмов поиска малоразмерных объектов.

На рисунке 6 представлены результаты обработки аэроизображений для двух классов характерных событий, осуществляемой с помощью разработанного программного комплекса при сопровождении малоразмерных объектов.



а – появление схожего объекта; б – пересеченная местность

Рисунок 6. – Сопровождение объекта при различных условиях его наблюдения

Программный комплекс разработан в среде программирования С++ и позволяет производить устойчивое сопровождение объектов размером 16–900 пикселей с вероятностью правильного обнаружения цели в диапазоне от 87 до 99 % при различных условиях наблюдения. Время стабилизации видеоизображения изменяется в диапазоне 7–10 мс для различных условий съемки. Время поиска объектов изменяется в диапазоне 5–25 мс и зависит от размера объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Алгоритм селективно-ковариационного пространственного поиска малоразмерных объектов на основе интегрального ковариационного дескриптора и пространственно-временного предсказания местоположения, размера и формы области поиска объекта. Отличительной особенностью данного алгоритма является обработка события отсутствия цели на видеокадре. Он позволяет уменьшить время поиска и повысить вероятность правильного обнаружения цели, а также сопровождать быстродвижущиеся малоразмерные объекты за счет уменьшения размера области поиска. В случае понижения частоты кадров предложенный алгоритм позволяет повысить вероятность правильного обнаружения цели на 10,2 % в условиях сопровождения с высоты порядка 300 м и до 49 % в условиях сопровождения с высоты порядка 400 м. Определено, что предложенный алгоритм обеспечивает устойчивый поиск объектов, размер которых изменяется в диапазоне от 16 до 900 пикселей, в реальном масштабе

времени [3, 9, 10].

2. Метод пространственно-частотного ковариационного поиска малоразмерных объектов на основе непрореженного ЛВП Хаара, позволяющий повысить устойчивость к шуму и изменению яркостно-контрастных характеристик аэроизображений. Использование непрореженного ЛВП Хаара позволяет сохранить пространственно-частотную информацию о сопровождаемом объекте за счет исключения операции декомпозиции на четные и нечетные отсчеты. Предложенный метод обеспечивает повышение устойчивости к зашумлению на 10,7 % и к изменению яркостно-контрастных характеристик аэроизображений на 4,4 % при использовании коэффициентов четырех поддиапазонов одноуровневого непрореженного ЛВП Хаара, характеризующихся высокой степенью декорреляции [2, 5, 6, 7, 11].

3. Алгоритм ковариационной стабилизации видеоизображения на основе сопоставления ковариационных вейвлет-признаков и коррекции положения реперных областей. Он позволяет повысить устойчивость в условиях зашумления до 3,5 раза для высококонтрастных и до 16 раз для низкоконтрастных аэроизображений, в случае изменения яркостно-контрастных характеристик – до 10 раз и до 11,5 раза для высококонтрастных и низкоконтрастных аэроизображений соответственно. Использование дескриптора на основе прореженного ЛВП позволяет уменьшить время вычислений в 5,2 раза для класса высококонтрастных аэроизображений и в 2,8 раза для класса низкоконтрастных аэроизображений. Использование дескриптора на основе непрореженного ЛВП приводит к снижению времени вычислений в 1,2 раза для класса высококонтрастных аэроизображений и увеличению в 1,5 раза для класса низкоконтрастных аэроизображений [4, 6, 12, 13].

4. Метод адаптивной ковариационной стабилизации видеоизображения, основанный на интегральном ковариационном дескрипторе и селективно-блочном поиске реперных областей и позволяющий увеличить устойчивость в условиях низкого отношения сигнал – шум за счет использования градиентных признаков и уменьшить время вычислений за счет использования селективно-блочного поиска соответствия между динамическими окнами-кандидатами и эталонным образом реперной области. Использование предложенного метода позволяет повысить устойчивость в случае сильного зашумления (дисперсия гауссова шума выше 0,12) до 16 раз для четырех динамических окон-кандидатов и трех итераций и до 18 раз для девяти динамических окон-кандидатов и трех итераций, в случае значительного изменения яркостно-контрастных характеристик (коэффициент коррекции контраста выше 2,5) – до 8,1 раза для класса высококонтрастных аэроизображений и до 9 раз для класса низкоконтрастных аэроизображений [1, 8, 13].

5. Определены нелинейные зависимости влияния аппроксимирующих и детализирующих поддиапазонов вейвлет-матрицы на точность и время поиска

малоразмерных объектов. Установлены закономерности ковариационной адаптации, представляющие собой совокупность выявленных зависимостей влияния количества динамических окон-кандидатов и числа итераций на точность и время поиска реперных областей. Они обеспечивают сохранение устойчивости процесса поиска в условиях зашумления и низкого контраста аэроизображений [1, 2, 5, 6, 7, 8, 11, 13]

6. Программные средства стабильного сопровождения малоразмерных объектов на основе разработанных методов и алгоритмов.

Предложенные методы и алгоритмы поиска малоразмерных объектов и стабилизации видеоизображения реализованы на языке программирования C++. Для уточнения пространственно-временного предсказания позиции цели используются данные телеметрии (углы ориентации БЛА и видеокамеры), поступающие с борта БЛА. В программном комплексе производится расчет географических координат цели, ее скорости и направления движения.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенные методы и алгоритмы представляют собой основу для разработки:

1. Аппаратно-программного комплекса для легких БЛА с целью развития и совершенствования систем мониторинга местности, основанного на пространственно-частотной обработке аэроизображений.

2. Программные средства вычисления и анализа свойств низкоуровневых и среднеуровневых пространственно-частотных признаков с целью оценки эффективности поиска объектов на статических и динамических изображениях для использования в учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по дисциплинам «Цифровая обработка и защита мультимедийной информации», «Цифровая обработка речи и изображений», «Программная обработка мультимедийной информации».

3. Программного комплекса для развития и совершенствования систем мониторинга воздушного и водного пространства, дорожного движения.

В приложениях представлены результаты моделирования предложенных методов и алгоритмов на тестовых видеопоследовательностях в условиях понижения частоты видеокадров (приложение А), в условиях зашумления видеокадров (приложение Б), в условиях изменения яркостно-контрастных характеристик видеокадров (приложение В) и акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы (приложения Г, Д и Е).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Борискевич, И.А. Итеративный алгоритм обнаружения объектов в видеопоследовательности на основе гистограммных пространственных метрик / И.А. Борискевич // Доклады БГУИР. – 2013. – № 2. – С. 38–44.

2. Борискевич, И.А. Пространственно-частотный ковариационный поиск малоразмерных целей на основе непрореженного дискретного вейвлет-преобразования Хаара / И.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 3. – С. 16–21.

3. Борискевич, И.А. Сопровождение малоразмерных целей с нестационарной видеокамеры на основе ковариационных признаков и предсказания / И.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2014. – № 3. – С. 33–39.

4. Борискевич, И.А. Стабилизация видеопоследовательности с борта легкого БЛА на основе ковариационного поиска реперов и предсказания / И.А. Борискевич, В.Ю. Цветков // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 1. – С. 106–111.

Статьи в сборниках материалов конференций и семинаров

5. Борискевич, И.А. Оценка эффективности использования дискретного вейвлет-преобразования Хаара для сопровождения малоразмерных целей / И.А. Борискевич, В.Ю. Цветков, Ф.А.М. Аль-Хелли // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы Международного научно-технического семинара, Минск, апрель – декабрь 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 16–21.

6. Борискевич, И.А. Выбор вейвлет-преобразования для пространственно-частотного ковариационного поиска цели / И.А. Борискевич // Развитие информатизации и гос. системы науч.-техн. инф. (РИНТИ – 2014): материалы научн.-техн. конф., Минск, 2014 / ОИПИ НАНБ. – Минск, 2014. – С. 257–261.

Тезисы докладов на научных конференций

7. Борискевич, И.А. Алгоритм обнаружения низкоконтрастных объектов в видеопоследовательности на основе избыточного дискретного вейвлет-преобразования / И.А. Борискевич // Технические средства защиты информации: тез. докл. X Белорусско-российской научно-технической конференции, Минск, 29–30 мая 2012 г. / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 23.

8. Борискевич, И.А. Алгоритм обнаружения объектов на изображении с

использованием глобального метода оптимизации / И.А. Борискевич // Россия – Беларусь – Сколково: единое инновационное пространство: тез. Междунар. научн. конф., Минск, 2012. – С. 202–203.

9. Борискевич, И.А. Оценка и выбор параметров низкочастотных фильтров для обработки видимых и ИК-изображений / И.А. Борискевич // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 8-й Междунар. молодежн. научн.-техн. конф., Севастополь, 23–27 апреля 2012 г. / СевГУ. – Севастополь, 2012. – С. 340.

10. Борискевич, И.А. Адаптивное сопровождение на основе статистической оценки параметров цели / И.А. Борискевич // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: материалы конф. В 2 ч. Ч. 1, Минск, 18–19 марта 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 255.

11. Руис, Л.А. Методика анализа и оценки частотно-пространственных свойств дискретного лифтинг вейвлет-преобразования / Л.А. Руис, А.А. Борискевич, И.А. Борискевич // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: материалы конф. В 2 ч. Ч. 1, Минск, 18–19 марта 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 253–254.

12. Борискевич, И.А. Алгоритм интеграции двухапертурных изображений в вейвлет-области / И.А. Борискевич // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 9-й Междунар. молодежн. научн.-техн. конф., Севастополь, 22–26 апреля 2013 г. / СевГУ. – Севастополь, 2013. – С. 325.

13. Борискевич, И.А. Сопоставление матриц гомографии по телеметрии и видеоданным с борта БЛА / И.А. Борискевич, В.Ю. Цветков, С.В. Пручковский // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации: сб. тез. докл. 4-й Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 15–16 мая 2014 / ВА РБ. – Минск, 2014. – С. 186.

Патенты

14. Устройство доменного вычисления коэффициентов прямого двухмерного вейвлет-преобразования Хаара: пат. Респ. Беларусь, МПК G 06F 17/00 / А.А. Борискевич, В.Ю. Цветков, И.А. Борискевич, Л.А. Руис; заявитель Бел. гос. ун-т информ. и радиоэл. – № u 20130259; заявл. 26.03.13 / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2013.

РЭЗІЮМЭ

Барыскевіч Ілья Анатольевіч

Пошук аб'ектаў на аснове прасторава-частотнай каварыяцыйнай апрацоўкі аэравідарысаў

Ключавыя словы: апрацоўка аэравідарысаў, пошук малапамерных аб'ектаў, стабілізацыя відэавідарыса, каварыяцыйная матрыца, ліфтынг вэйвлет-пераўтварэнне.

Мэта працы: распрацоўка метадаў і алгарытмаў пошуку малапамерных аб'ектаў і стабілізацыі відэавідарыса ва ўмовах нестацыянарнай відэакамеры бартвога оптыка-электроннага модуля БЛА з улікам яркасна-кантрасных і прасторава-часавых характарыстык аэравідарысаў на аснове іх прасторавай апрацоўкі і ліфтынг вэйвлет-пераўтварэння.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: тэорыя лічбавай апрацоўкі відарысаў, тэорыя імавернасці, асновы аптымізацыйных метадаў, аб'ектава-арыентаванае праграмаванне, оптыка-электронны модуль БЛА, асяроддзі праграмавання C++ і Matlab.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны алгарытм селектыўна-каварыяцыйнага пошуку і метады прасторава-частотнага каварыяцыйнага пошуку малапамерных аб'ектаў, якія дазваляюць у параўнанні з вядомым каварыяцыйным метадам павялічыць імавернасць правільнага выяўлення цэлі да 15,5 % і хуткадзейнасць да 8,3 разоў.

Распрацаваны алгарытм каварыяцыйнай стабілізацыі відэавідарыса і метады адаптыўнай каварыяцыйнай стабілізацыі відэавідарыса, якія дазваляюць у параўнанні з вядомым метадам на аснове SURF павялічыць устойлівасць стабілізацыі відэавідарыса да 18 разоў ва ўмовах нізкай суадносіны сігнал-шум і да 11,5 раз пры пагаршэнні яркасна-кантрасных характарыстык аэравідарысаў, а таксама паменшыць час пошуку рэперных рэгіёнаў да 5,2 разоў.

Ступень выкарыстання: вынікі даследавання ўжытыя ў беспілотных авіяцыйных комплексах (БАК) «Бусел-М», «Бусел М50», БАК ЭМ, БАК «Буравеснік», якія вырабляюцца НПЦ «Беспілотныя авіяцыйныя комплексы і тэхналогіі» ДНУ «Фізіка-тэхнічны інстытут НАН Беларусі», і ў навучальным працэсе ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі».

Вобласць прымянення: відэаназіранне, робататэхніка, навігацыя, беспілотныя авіяцыйныя комплексы.

РЕЗЮМЕ

Борискевич Илья Анатольевич

Поиск объектов на основе пространственно-частотной ковариационной обработки аэроизображений

Ключевые слова: обработка аэроизображений, поиск малоразмерных объектов, стабилизация видеоизображения, ковариационная матрица, лифтинг вейвлет-преобразование.

Цель работы: разработка методов и алгоритмов поиска малоразмерных объектов и стабилизации видеоизображения в условиях нестационарности видеокамеры бортового оптико-электронного модуля БЛА с учетом яркостно-контрастных и пространственно-временных характеристик аэроизображений на основе их пространственной обработки и лифтинг вейвлет-преобразования.

Методы исследования и использованная аппаратура: теория цифровой обработки изображений, теория вероятности, основы оптимизационных методов, объектно-ориентированное программирование, оптико-электронный модуль БЛА, среды программирования C++ и Matlab.

Полученные результаты и их новизна: разработаны алгоритм селективно-ковариационного поиска и метод пространственно-частотного ковариационного поиска малоразмерных объектов, позволяющие по сравнению с известным ковариационным методом увеличить вероятность правильного обнаружения цели до 15,5 % и быстродействие до 8,3 раза.

Разработаны алгоритм ковариационной стабилизации видеоизображения и метод адаптивной ковариационной стабилизации видеоизображения, позволяющие по сравнению с известным методом на основе SURF увеличить устойчивость стабилизации видеоизображения до 18 раз в условиях низкого отношения сигнал-шум и до 11,5 раза при ухудшении яркостно-контрастных характеристик аэроизображений, а также уменьшить время поиска реперных областей до 5,2 раза.

Степень использования: результаты исследования применены в беспилотных авиационных комплексах (БАК) «Бусел-М», «Бусел М50», БАК ЭМ, БАК «Буревестник», производимых НПЦ «Беспилотные авиационные комплексы и технологии» ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», и учебном процессе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Область применения: видеонаблюдение, робототехника, навигация, беспилотные авиационные комплексы.

SUMMARY

Baryskievic Ilja Anatoljevic

Search of objects based on spatial-frequency covariance processing of aerial images

Keywords: aerial images processing, search of small objects, video stabilization, covariance matrix, lifting wavelet transform.

Aim of the work: development of methods and algorithms for searching small objects and video stabilization under condition of non-stationary camera of UAV onboard optical-electronic module with the brightness-contrast and spatial-temporal characteristics of aerial images based on their spatial processing and lifting wavelet transform.

Research methods and used facilities: theory of digital image processing, probability theory, basics of optimization methods, object-oriented programming, UAV optical-electronic module, programming environments C++ and Matlab.

Obtained results and their novelty: an algorithm of selective-covariance search and a method of spatial-frequency covariance search for small objects are developed. They allow us to increase the probability of correct target detection up to 15,5 % and speed up to 8,3 times as compared with the standard covariance method.

An algorithm of covariance video stabilization and a method of adaptive covariance video stabilization are developed. They allow us to increase robustness of video stabilization up to 18 times in the case of low signal-to-noise ratio and up to 11.5 times in the case of brightness-contrast degradation of aerial images and decrease time of reference areas search up to 5,2 times as compared with the known stabilization method SURF.

Use guidelines: the results of research are applied on unmanned aircraft systems (UAS) "Busiel-M", "Busiel M50", UAS EM, UAS "Buraviesnik", produced by SPC "Unmanned aircraft systems and technologies" SSI "Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", and in educational process of the educational establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".

Application area: surveillance, robotics, navigation, unmanned aircraft systems.

Борискевич Илья Анатольевич

**ПОИСК ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОЙ
КОВАРИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики

Подписано в печать .09.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч. изд. л. . Тираж 60 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6.