

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 004.932

ЖУРАВЛЁВ
Александр Александрович

**КОДИРОВАНИЕ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КАДРОВОЙ
КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПО ФОТОПЛАНУ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности **05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

Минск 2015

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

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

Официальные оппоненты: **Липницкий Станислав Феликсович**, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией государственного научного учреждения «Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси»

Пальцев Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-производственного общества с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»

Оппонирующая организация учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится 21 мая 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

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

Автореферат разослан « 17 » апреля 2015 г.

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

Н.В. Тарченко

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Республике Беларусь интенсивно развиваются технологии дистанционного видеомониторинга на базе беспилотных авиационных комплексов (БАК). Типовым применением БАК является циклический мониторинг границ и транспортных магистралей. В данных условиях видеокодеки, использующие предсказание по опорному кадру на основе блочной компенсации движения, такие как MPEG-4 и H.264, не эффективны. Они осуществляют поиск схожих блоков на опорном кадре без учета масштаба, поворота и проективных искажений и не учитывают дублирование опорных кадров предыдущих циклов мониторинга. Устранение данных недостатков возможно за счет использования фотоплана трассы пролета в качестве опорного изображения. Это требует сопоставления с фотопланом прогнозируемого кадра. Широко используемые методы сопоставления, основанные на градиентной идентификации реперных точек, в рассматриваемых условиях не эффективны из-за высокой чувствительности к изменениям яркости, контраста и зашумлению. По сравнению с точками более устойчивыми являются прямые контурные линии, сохраняющие свое положение и ориентацию. В работе исследуются и разрабатываются методы и средства кодирования аэроизображений на основе компенсации движения по фотоплану и совмещения изображений на основе идентификации прямых контурных линий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Исследования проводились на кафедре сетей и устройств телекоммуникаций учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках выполняемой научно-исследовательской госбюджетной темы ГБ 06-2033 «Разработка методов обработки, передачи и распределения мультимедийной информации» (этап «Разработать и исследовать высокоскоростные методы передачи мультимедийной информации по различным каналам связи»).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке методов и средств кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану и сопоставления изображений с фотопланом (опорным изображением) по угловым идентификаторам прямых линий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методы локализации и параметризации прямых линий, обеспечивающие устойчивое сопоставление изображений земной поверхности с фотопланом в условиях изменения масштаба, яркости и контраста;
- разработать алгоритм кадровой компенсации движения по фотоплану, обеспечивающий выделение фрагмента фотоплана, соответствующего прогнозируемому изображению земной поверхности, и построение на его основе прогнозного изображения;
- разработать алгоритм кодирования и структуру кодека аэроизображений, обеспечивающие повышение коэффициента сжатия за счет исключения повторного кодирования и передачи областей изображений, соответствующих фотоплану.

Объектом исследования в диссертационной работе являются методы и средства выделения и параметризации прямых линий и кодирования аэроизображений. Выбор данных объектов исследования обусловлен актуальностью проблемы повышения пропускной способности систем циклического видеомониторинга земной поверхности, эффективным подходом к решению которой является сокращение объема передаваемой информации за счет исключения повторной передачи областей перекрытия изображений и фотоплана. Предметом исследования являются методы и средства угловой локализации и параметризации прямых линий и кодирования изображений земной поверхности с использованием кадровой компенсации движения по фотоплану.

Научная новизна

Предложен масочно-фазовый метод локализации прямых линий на изображении, позволяющий уменьшить вычислительную сложность, а также повысить устойчивость локализации и параметризации прямых линий на изображении в условиях изменения яркости, контраста и зашумления изображения.

Предложен метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов на изображениях, позволяющий улучшить устойчивость локализации и параметризации в условиях изменения яркости и контраста изображения, а также уменьшить вычислительную сложность.

Предложен алгоритм кадровой компенсации движения видеокамеры на основе фотоплана для сжатия аэроизображений в системе циклического видеомониторинга наземных объектов, позволяющий увеличить точность предсказания прогнозируемого изображения за счет использования фотоплана в качестве опорного изображения.

Предложен алгоритм эффективного кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения видеокамеры по опорному изображению, позволяющий увеличить пиковое соотношение сигнал-шум за счет использования кадровой компенсации движения.

Положения, выносимые на защиту

1. Масочно-фазовой метод локализации прямых линий на изображении на основе бинарных масок и пространственно-ориентированного преобразования Хафа, обеспечивающий сокращение числа вычислительных процедур локализации в 3,6 раза и повышение устойчивости результатов локализации к изменению яркости на 12 %, к изменению контраста на 22 % и к зашумлению изображения более чем на 35 % по сравнению с методом Хафа за счет предварительного квантования контурных отрезков по ориентации и последующего уточнения их принадлежности к прямым линиям.

2. Метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов на основе определения длин и углов пересечения прямых контурных линий, обеспечивающий: а) увеличение устойчивости на 8 % к возможному изменению яркости относительно номинального значения в пределах от -90% до -50% и от $+75\%$ до $+90\%$, б) повышение устойчивости соответственно на 25–55 % и 15–30 % к изменению контраста в пределах от -99% до -20% и от $+40\%$ до $+99\%$, в) увеличение быстродействия на 20 % по сравнению с методами SURF/RANSAC – за счет использования более устойчивых реперов и сокращения числа вычислительных процедур.

3. Алгоритм кадровой компенсации движения на основе фотоплана, обеспечивающий уменьшение ошибки предсказания прогнозируемого изображения в 5,3 раза по сравнению с методом блочной компенсации движения за счет идентификации соответствующего фрагмента фотоплана и формирования на его базе прогнозного изображения.

4. Алгоритм кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану, обеспечивающий увеличение отношения пикового значения сигнала к шуму (PSNR) на 1дБ по сравнению с методом сжатия H.264 и на 2 дБ по сравнению с методом MJPEG-2000 при коэффициентах сжатия более 10 за счет замещения прогнозируемого изображения фрагментом фотоплана.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании методов угловой локализации и параметризации реперов

и кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану, постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик, оценке эффективности разработанных методов и средств, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Сети и устройства телекоммуникаций» УО «БГУИР» В.Ю. Цветковым.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Минск, Беларусь, 2010 г., 2012 г., 2013 г., 2014 г.); Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: Сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, Беларусь, 2010 г., 2011 г.); 5-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, Беларусь, 2011 г.); International scientific and technical conference (Baku, Azerbaijan, 2011); The 2nd International Scientific Conference on Information Technology, Foundation of Technical Education (Baghdad, Iraq, 2012); Международная конференция «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации» (Минск, Беларусь, 2013 г., 2014 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах общим объемом 1,32 авторских листа, 4 – в сборниках статей по материалам конференций; 6 – в тезисах докладов научно-технических конференций. Получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и пяти приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 134 страницы, из них 76 страниц основного текста, 68 рисунков на 29 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, 5 приложений на 14 страницах, библиография из 146 источников на 13 страницах, включая 15 публикаций автора.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость разработки и исследования методов и средств кодирования видеоданных на основе кадровой компенсации движения.

В **первой главе** проведен анализ методов кодирования подвижных и неподвижных изображений; рассмотрены методы компенсации движения; рассмотрены методы локализации и параметризации реперов для сопоставления изображений.

Показано, что в условиях циклического видеомониторинга с использованием БЛА коэффициент сжатия аэроизображений может быть увеличен за счет исключения повторного кодирования и передачи областей соответствия этих изображений и фотоплана. В результате возникает необходимость разработки методов кодирования перекрывающихся изображений на основе определения областей соответствия этих изображений. Решение данной задачи требует исследования методов быстрой локализации, параметризации и идентификации реперов на совмещаемых изображениях.

Известные методы градиентной локализации и параметризации реперов, такие как SIFT и SURF, формируют идентификаторы реперов с учетом поворота, масштабирования и изменения яркости изображений. Показано, что данные методы имеют низкое быстродействие и требуют значительных вычислительных ресурсов на этапе локализации реперов. Также данные методы имеют низкий уровень устойчивости реперов в условиях изменения яркости и контраста изображения. Устранение данных недостатков возможно за счет использования на изображении длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственных ориентаций в качестве идентификационных параметров реперов.

Во **второй главе** предложен алгоритм кадровой компенсации движения по фотоплану, а также алгоритм кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения [2, 3].

Алгоритм кадровой компенсации движения (FMC – Frame Motion Compensation) [2] основан на использовании фотоплана в качестве опорного кадра для формирования прогнозного кадра и последующего кодирования

различий между прогнозируемым и прогнозным кадрами. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. На основе изображений, полученных ранее с борта летательного аппарата, при положении оптической оси видеокamеры, которое примерно перпендикулярно вектору ее перемещения, формируется библиотека фотопланов $\{P(s, w, t)\}_{(s=\overline{0, S-1}, w=\overline{0, W-1}, t=\overline{0, T-1})}$, где s, w, t – индексы, соответственно учитывающие сезонность фотоплана, погодные условия и время суток (рисунок 1).

2. Формирование библиотеки реперных образов (совокупность всех реперов изображения) фотопланов $\{R_P(s, w, t)\}_{(s=\overline{0, S-1}, w=\overline{0, W-1}, t=\overline{0, T-1})}$.

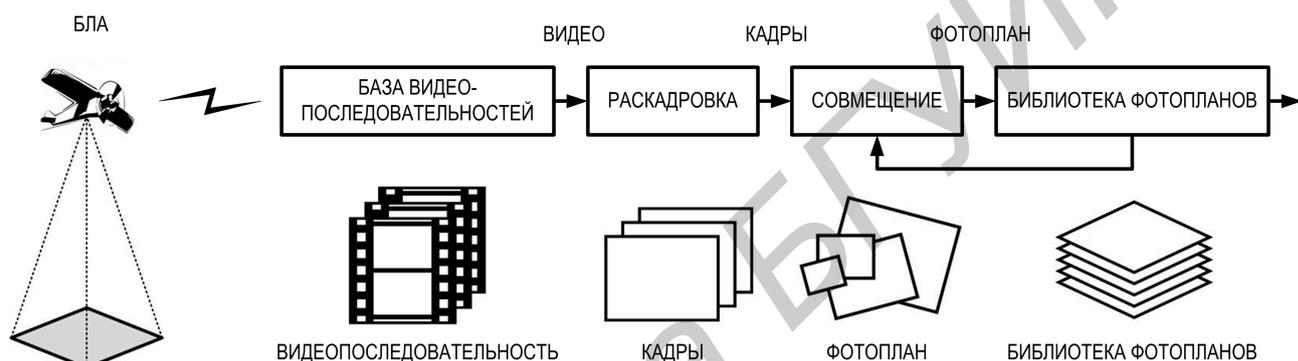


Рисунок 1. – Формирование библиотеки фотопланов

3. Формирование реперного образа прогнозируемого изображения $R_F(k) = \|r_F(n, k)\|_{(n=\overline{0, N_I(k)-1})}$, где $r_F(n, k) = \{y_F(n, k), x_F(n, k), D_F(n, k)\}$ – репер, состоящий из трех элементов: $y_F(n, k), x_F(n, k)$ – координат местоположения репера на прогнозируемом кадре $F(k)$ и $D_F(n, k) = \|d_F(l, n, k)\|_{(l=\overline{0, L_D-1})}$ – идентификатора.

4. Поиск фрагмента фотоплана, соответствующего прогнозируемому изображению, и сопоставление реперного образа прогнозируемого изображения $R_F(k)$ с библиотекой реперных образов фотопланов $\{R_P(s, w, t)\}_{(s=\overline{0, S-1}, w=\overline{0, W-1}, t=\overline{0, T-1})}$.

5. Формирование прогнозного изображения.

6. Вычисление значений средней яркости $f_M(k)$ и $f'_M(k)$ прогнозируемого $F(k)$ и прогнозного кадров $F'(k)$ соответственно. На основе соотношения значений средней яркости $f_M(k)$ и $f'_M(k)$ вычисляется корректирующий коэффициент $\delta_f(k)$.

Показано, что уменьшение ошибки предсказания кадровой компенсации движения в 5,3 раза по отношению к блочной достигается за счет увеличения числа вычислительных процедур.

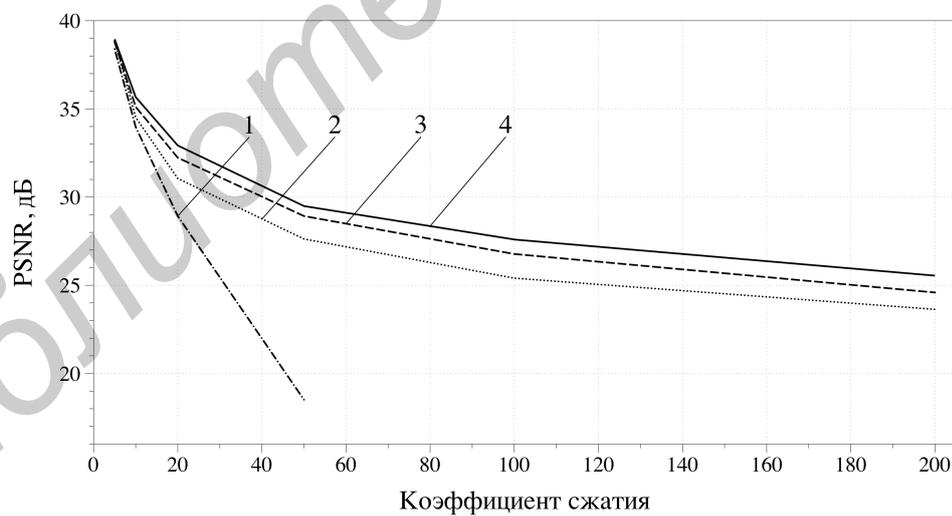
Разработанный алгоритм кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения основан на поиске фрагмента фотоплана, соответствующего прогнозируемому кадру, плоской гомографии (проективного преобразования из одной плоскости в другую) найденного фрагмента в прогнозный кадр, замещающий прогнозируемый кадр, вычислении и кодировании различий между прогнозируемым и прогнозным изображениями. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. На основе кадровой компенсации движения [2] формируется прогнозный кадр и производится его яркостная коррекция.

2. На основе прогнозируемого $F(k)$ и скорректированного по яркости прогнозного $\hat{F}(k)$ кадров формируется разностный кадр $\tilde{F}(k) = \|\tilde{f}(y, x, k)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$, где $\tilde{f}(y, x, k)$ – значение пикселей разностного кадра.

3. Кодирование разностного кадра $\tilde{F}(k)$ производится одним из известных методов сжатия: JPEG, JPEG 2000 или другим.

Показано [3], что при коэффициентах сжатия более 10 разработанный метод кодирования обеспечивает увеличение пикового отношения сигнал–шум на 1дБ по сравнению с методом сжатия H.264 и на 2 дБ по сравнению с методом MJPEG-2000 (рисунок 2).



1 – MJPEG; 2 – MJPEG 2000; 3 – H.264; 4 – FMC

Рисунок 2. – Зависимость PSNR от коэффициента сжатия

В третьей главе предложены прогрессивный и масочно-фазовый методы локализации прямых на изображении, а также метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов [1, 4, 5].

Разработанный метод прогрессивной локализации прямых основан на ориентированном преобразовании Хафа над множеством кратномасштабных

аппроксимированных образов изображения. Метод позволяет сократить вычислительную сложность и повысить устойчивость результатов поиска к изменению контраста изображения. Метод состоит из следующих шагов:

Алгоритм прогрессивной локализации прямых состоит из следующих шагов.

1. Формирование L -уровневой пирамиды аппроксимированных образов изображения.

2. Контурная обработка низкочастотного образа изображения на верхнем $L - 1$ уровне пирамиды аппроксимированных образов.

3. Преобразование Хафа над бинарным контурным образом. Формируются матрицы $H_A(L - 1)$ и $H_D(L - 1)$ параметров Хафа в результате вычисления с помощью функции Хафа f_H угла $h_A(L - 1, y, x, n_V)$ между осью абсцисс и перпендикуляром к виртуальной прямой с индексом n_V , проходящей через пиксель с координатами $(L - 1, y, x)$, и длины $h_D(L - 1, y, x, n_V)$ этого перпендикуляра для каждого контурного пикселя $p_C(L - 1, y, x) = 1$ бинарного контурного образа $P_C(L - 1)$.

4. Выявление прямых контурных линий на бинарном контурном образе.

5. Определение областей поиска прямых контурных линий на нижнем по иерархии l -м ($l < L - 1$) уровне $P_l(l)$ пирамиды P_l аппроксимированных образов.

6. Контурная обработка низкочастотного образа изображения под маской на l -м уровне пирамиды аппроксимированных образов.

7. Пространственно-ориентированное преобразование Хафа над бинарным контурным образом.

8. Выявление прямых контурных линий на бинарном контурном образе на l -м уровне пирамиды аппроксимированных образов.

9. Проверка окончания цикла. Если $l > 0$, то $l = l - 1$ и переход на шаг 5. Если $l = 0$, окончание цикла.

В результате формируются матрица $P_S(0) = \|p_S(0, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ принадлежности контурных пикселей бинарного контурного образа $P_C(0)$ прямым контурным линиям и матрица $P_P(0) = \|p_P(0, n_S)\|_{(n_S=1, \overline{N_S(0)})}$ вероятностей прямых контурных линий, где $p_P(0, n_S)$ – элемент матрицы, который характеризует длину прямой контурной линии n_S . Поскольку 0-й уровень соответствует самому изображению, то данные результаты относятся непосредственно к изображению.

Показано [5], что разработанный метод прогрессивной локализации прямых на основе ориентированного преобразования Хафа имеет примерно в 10 раз меньшую вычислительную сложность по сравнению с классическим

преобразованием Хафа для изображений размером 480x640 пикселей. Установлено [5], что предложенный метод прогрессивной локализации прямых превосходит по стабильности метод локализации прямых на основе преобразования Хафа при изменении контраста на 30 %.

Сущность масочно-фазового метода локализации прямых состоит в использовании библиотеки из четырех бинарных масок размером 3x3 пикселей для предварительного грубого квантования по ориентации контурных элементов изображения и последующем уточнении их принадлежности прямым с помощью пространственно-ориентированного преобразования Хафа, применяемого к каждому контурному элементу в ограниченном секторе, определяемом ориентацией этого элемента. Каждая бинарная маска состоит из трех единичных пикселей, образующих прямолинейный отрезок с угловой ориентацией $\alpha = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$. Алгоритм масочно-фазовой локализации прямых состоит из следующих шагов [1].

1. В результате контурной обработки исходного изображения размером $Y \times X$ пикселей формируется бинарный контурный образ $P_C = \|p_C(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$.

2. Окрестность 3x3 пикселей каждого элемента $p_C(y, x) = 1$ бинарного контурного образа P_C проверяется на соответствие четырем контурным маскам. В результате данного шага формируются четыре бинарных контурных образа $\{C(\alpha)\}_{(\alpha=\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\})}$, соответствующих четырем угловым ориентациям (рисунок 3).

3. Для каждого элемента $c(y, x, \alpha) = 1$ каждого бинарного образа с помощью преобразования Хафа T_H вычисляются параметры Хафа $\{h_A(y, x, n_V, \alpha), h_D(y, x, n_V, \alpha)\}_{(n_V=\overline{0, N_V-1})}$ с помощью выражения

$$\forall c(y, x, \alpha) (c(y, x, \alpha) = 1) \rightarrow \{h_A(y, x, n_V, \alpha), h_D(y, x, n_V, \alpha)\}_{(n_V=\overline{0, N_V-1})} \Leftarrow T_H(y, x) \quad (1)$$

при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$, $\alpha = \{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$,

где $h_A(y, x, n_V, \alpha)$ – угол между осью абсцисс и перпендикуляром к виртуальной прямой с индексом n_V , проходящей через элемент $c(y, x, \alpha)$; $h_D(y, x, n_V, \alpha)$ – длина этого перпендикуляра; $N_V = 2\Delta_K / \Delta_V$ – число виртуальных прямых, проходящих через элемент $c(y, x, \alpha)$ под углами $h \in [\alpha - \Delta_K, \alpha + \Delta_K]$ с угловой разностью Δ_V ; $2\Delta_K$ – диапазон применения пространственно-ориентированного преобразования Хафа.

4. Анализ фазового пространства преобразования Хафа и выделение прямых контурных линий на бинарных образах $\{C(\alpha)\}_{(\alpha=\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\})}$.

5. Удаление коротких и прерывистых прямых контурных линий.

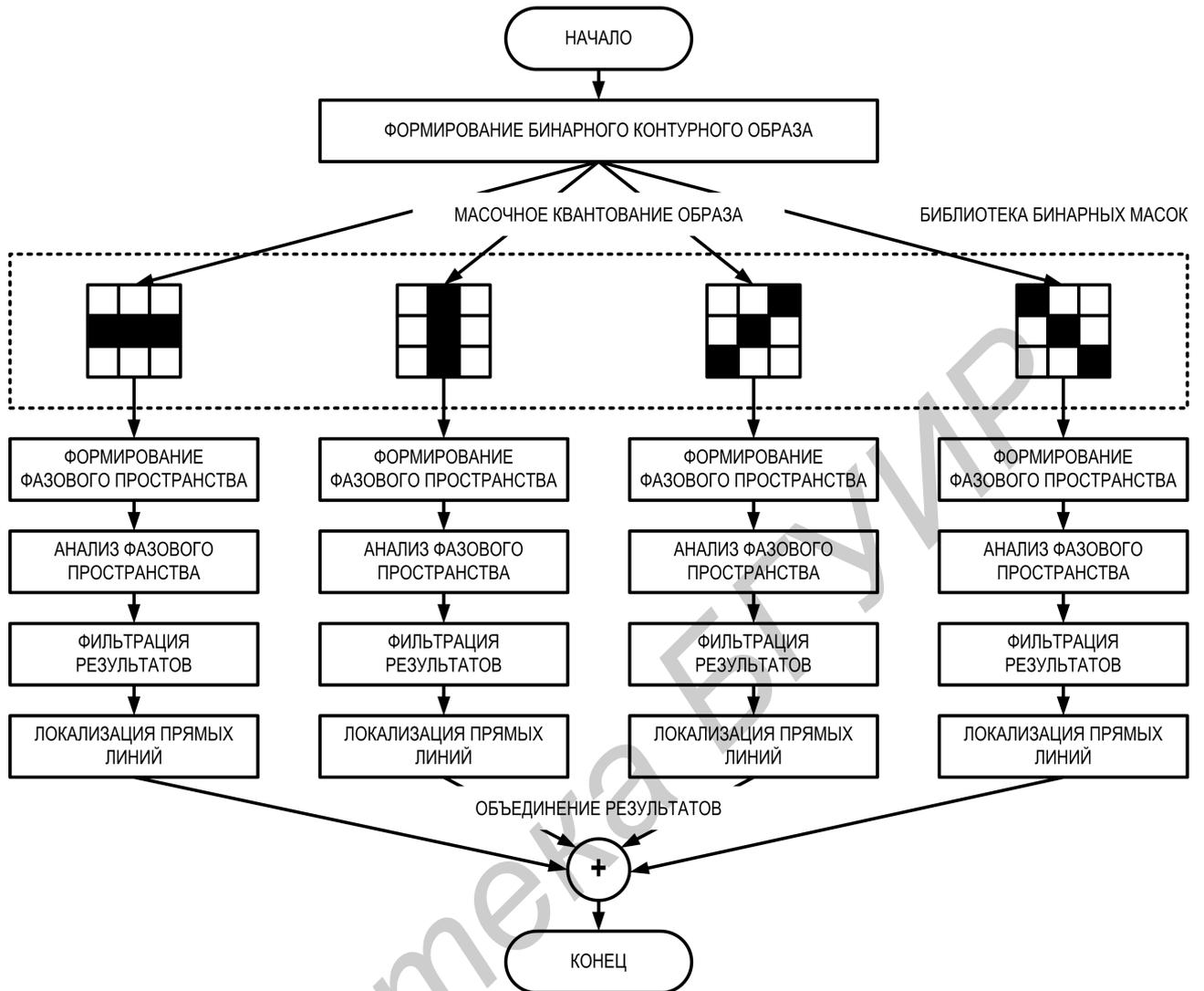


Рисунок 3. – Блок-схема масочно-фазового метода локализации прямых линий на изображении

6. Локализация прямых линий на бинарных образах $\{C(\alpha)\}_{(\alpha=\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\})}$.

7. Объединение результатов поиска прямых контурных линий на бинарных образах $\{C(\alpha)\}_{(\alpha=\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\})}$. Формируется результирующее множество $\{h_A(n_R), h_D(n_R)\}_{(n_R=\overline{1, N_R})}$ параметров прямых контурных линий, значения которых вычисляются с помощью выражений [1]:

$$h_A(n_R) = \begin{cases} h_A(n_S, 0^\circ) & \text{при } n_R \leq N_S(0^\circ), \\ h_A(n_S, 45^\circ) & \text{при } N_S(0^\circ) < n_R \leq (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ)), \\ h_A(n_S, 90^\circ) & \text{при } (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ)) < n_R \leq (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ) + N_S(90^\circ)), \\ h_A(n_S, 135^\circ) & \text{при } (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ) + N_S(90^\circ)) < n_R \end{cases} \quad (2)$$

при $n_R = \overline{1, N_R}$,

$$h_D(n_R) = \begin{cases} h_D(n_S, 0^\circ) \text{ при } n_R \leq N_S(0^\circ), \\ h_D(n_S, 45^\circ) \text{ при } N_S(0^\circ) < n_R \leq (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ)), \\ h_D(n_S, 90^\circ) \text{ при } (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ)) < n_R \leq (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ) + N_S(90^\circ)), \\ h_D(n_S, 135^\circ) \text{ при } (N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ) + N_S(90^\circ)) < n_R \end{cases} \quad (3)$$

при $n_R = \overline{1, N_R}$,

где $N_R = N_S(0^\circ) + N_S(45^\circ) + N_S(90^\circ) + N_S(135^\circ)$ – общее число выделенных на шаге 4 контурных линий на образах $\{C(\alpha)\}_{(\alpha=\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\})}$. В результате выполнения данного алгоритма формируются множество $\{h_A(n_R), h_D(n_R)\}_{(n_R=\overline{1, N_R})}$ параметров прямых контурных линий и матрица P_R принадлежности контурных пикселей бинарного контурного образа P_C прямым контурным линиям, ненулевые элементы которой указывают на индексы n_R прямых контурных линий с параметрами $\{h_A(n_R), h_D(n_R)\}$.

Показано [1], что масочно-фазовый метод локализации прямых превосходит по стабильности метод на основе преобразования Хафа на 12 % при изменении яркости, на 22 % при изменении контраста. Масочно-фазовый метод позволяет более чем на 35 % повысить устойчивость выделения прямых к шуму по сравнению с преобразованием Хафа.

Метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов (ARCP – Angular Range of Crossing Points) в точках пересечения прямых основан на определении длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственной ориентации [4].

Алгоритм ARCP состоит из следующих шагов:

1. Для каждой n -й прямой контурной линии определяется угол $\alpha(n)$ ее наклона (угловая ориентация) относительно нижней границы изображения с помощью выражения

$$\alpha(n) = \arctg(|y_1(n) - y_2(n)| / |x_1(n) - x_2(n)|) \quad (4)$$

где $|\cdot|$ – операция по модулю; $x_i(n)$ и $y_i(n)$ координаты точек прямых.

2. Формируется фазовая матрица $D_P = \|d_P(\varphi)\|_{(\varphi=\overline{0, N_\varphi-1})}$ распределения вероятностей угловых ориентаций прямых контурных линий изображения, значения элементов $d_P(\varphi)$ которой определяют количество прямых контурных линий с угловыми ориентациями $\varphi(180/N_\varphi)$, где φ – индекс элемента фазовой матрицы; N_φ – число элементов в фазовых матрицах, определяющее точность учета угловых ориентаций прямых контурных линий.

Графическим отображением фазовой матрицы D_P является фазовая гистограмма, показывающая статистику угловых ориентаций прямых контурных линий на изображении.

3. Определение доминирующей угловой ориентации α_D прямых контурных линий изображения с помощью выражения [4]

$$\alpha_D = \varphi_{MAX}(180/N_\varphi), \quad (5)$$

где φ_{MAX} – индекс максимального элемента, указывающий на доминирующую угловую ориентацию α_D .

4. Переопределение угловых ориентаций прямых контурных линий относительно доминирующей угловой ориентации.

5. Локализация реперов в точках пересечения прямых контурных линий. Для каждой бесконечной прямой, соответствующей прямой контурной линии с нормированной угловой ориентацией $\bar{\alpha}(n)$, определяются координаты $(y_C(n, m), x_C(n, m))$ реперов в точках пересечения с бесконечными прямыми, соответствующими прямым контурным линиям с нормированными угловыми ориентациями $\bar{\alpha}(m)$. Для управления точностью и скоростью локализации реперов значения нормированных угловых ориентаций $\bar{\alpha}(n)$ и $\bar{\alpha}(m)$ ограничиваются условиями [4]

$$0 \leq \bar{\alpha}(n) < 90 - \alpha_S, \quad (6)$$

$$\text{mod}_{180}(\bar{\alpha}(n) + 90 - \alpha_S) \leq \bar{\alpha}(m) \leq \text{mod}_{180}(\bar{\alpha}(n) + 90 + \alpha_S), \quad (7)$$

где α_S – угол, определяющий сектор с угловым размером $2\alpha_S$, в котором отыскиваются пересекающиеся прямые; $\text{mod}_{180}(\cdot)$ – операция по модулю 180.

Значение α_S выбирается исходя из требуемой точности локализации и допустимого времени на локализацию реперов.

6. Угловая параметризация реперов. Для каждого репера с координатами $(y_C(n, m), x_C(n, m))$ формируется набор идентификационных параметров $\{\alpha_L(n, m), \alpha_C(n, m), R_L(n, m), R_C(n, m)\}$, включающий угловую ориентацию $\alpha_L(n, m)$ n -й прямой контурной линии, угол $\alpha_C(n, m)$ пересечения бесконечных прямых, соответствующих n -й и m -й прямым контурным линиям, нормированное расстояние $R_L(n, m)$ от конца n -й прямой контурной линии до репера, нормированное расстояние $R_C(n, m)$ от конца m -й прямой контурной линии до репера, которые вычисляются с помощью выражений [4]

$$\alpha_L(n, m) = \bar{\alpha}(n), \quad (8)$$

$$\alpha_C(n, m) = \text{mod}_{180}(\bar{\alpha}(n) - \bar{\alpha}(m)), \quad (9)$$

$$R_L(n, m) = L(n) / \max(L_1(n, m), L_2(n, m)), \quad (10)$$

$$R_C(n, m) = L(m) / \max(L_1(m, n), L_2(m, n)), \quad (11)$$

где $L(n) = \sqrt{(y_1(n) - y_2(n))^2 + (x_1(n) - x_2(n))^2}$, $L(m) = \sqrt{(y_1(m) - y_2(m))^2 + (x_1(m) - x_2(m))^2}$ – длины пересекающихся прямых контурных линий; $L_1(n, m), L_2(n, m), L_1(m, n), L_2(m, n)$ – расстояния от концов отрезков до точек пересечения

прямых контурных линий; $\max(\cdot)$ – операция выбора максимального из двух значений.

7. Для исключения ошибок идентификации при совмещении изображений в качестве реперов могут использоваться те, идентификационные параметры которых удовлетворяют условию [4]

$$\forall \alpha_L(n,m) \rightarrow \exists \alpha_L(n,k) ((\alpha_C(n,m) = \alpha_C(n,k)) \wedge (R_L(n,m) = R_L(n,k)) \wedge (R_C(n,m) = R_C(n,k))) \quad (12)$$

при $n = \overline{0, N_L - 1}$, $m \neq k$.

8. В зависимости от взаимного положения и длин двух прямых контурных линий реперы, удовлетворяющие условию (12) и локализуемые в точках пересечения бесконечных прямых, ранжируются с присвоением ранга $G(n, m)$, устанавливающим приоритет их выбора.

9. Каждому реперу, локализованному на шаге 7 и ранжированному на шаге 8 алгоритма, ставится в соответствие элемент множества $P_R = \|p_R(i)\|_{(i=\overline{0, N_R-1})}$ реперных идентификаторов, где N_R – число локализованных на изображении уникальных реперов; $p_R(i)$ – реперный идентификатор.

Сформированные в результате выполнения данного алгоритма реперные идентификаторы $p_R(i) = \{\hat{G}(i), \hat{\alpha}_L(i), \hat{\alpha}_C(i), \hat{R}_L(i), \hat{R}_C(i), \hat{y}(i), \hat{x}(i)\}$ позволяют идентифицировать соответствующие реперы на двух перекрывающихся изображениях. Это может быть сделано, например, с помощью метода RANSAC или другого аналогичного метода. Параллакс, возникающий при изменении ракурса изображения, учитывается за счет определения допустимого разброса значений для параметров $\hat{\alpha}_L(i)$, $\hat{\alpha}_C(i)$, $\hat{R}_L(i)$, $\hat{R}_C(i)$.

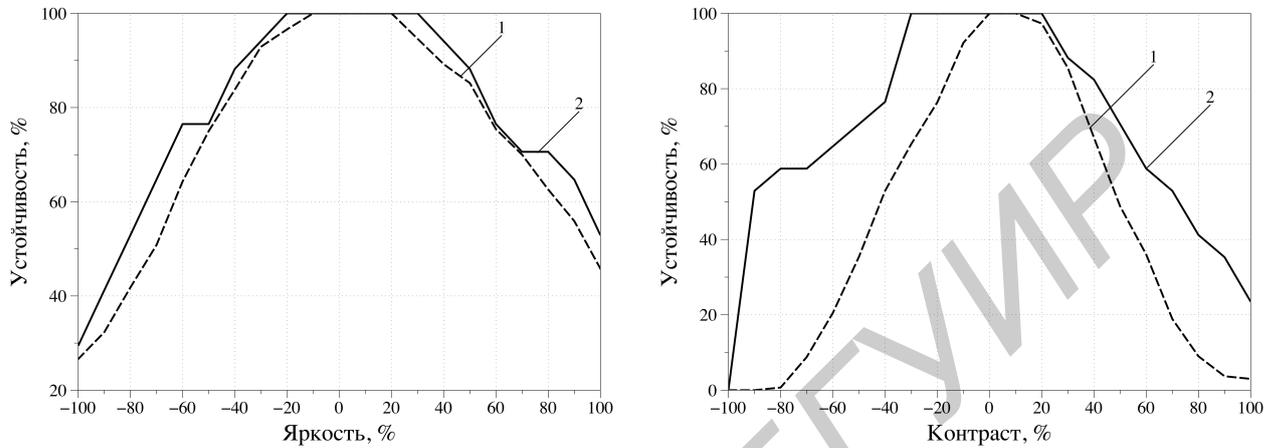
Установлено [4], что при изменении яркости в пределах от -90% до -50% , а также от $+75\%$ до $+90\%$ предложенный метод примерно на 8% более устойчив по сравнению с методами SURF/RANSAC. При изменении контраста изображения в пределах от -99% до -20% и от $+40\%$ до $+99\%$ предложенный метод обеспечивает выигрыш в устойчивости на $25-55\%$ и $15-30\%$ соответственно по сравнению с SURF/RANSAC (рисунок 4) [4]

Показано, что время на локализацию, параметризацию и идентификацию реперов на изображении с использованием предложенного метода составляет $0,74$ с, что на 20% быстрее по сравнению с методами SURF/RANSAC [4].

В **четвертой главе** рассматривается структура (рисунок 5) и характеристики видеокодека с кадровой компенсацией движения по фотоплану [15].

Видеокодек с кадровой компенсацией движения по фотоплану позволяет эффективно сжать и качественно восстановить аэроизображения, формируемые видеокамерой летательного аппарата в процессе циклического

видеомониторинга наземных объектов. Кадровая компенсация движения по фотоплану основана на замещении кодируемого аэроизображения фрагментом фотоплана, сформированного на основе аэроизображений, полученных на предыдущих циклах видеомониторинга.



1 – SURF/RANSAC; 2 – ARCP

Рисунок 4. – Устойчивость методов к изменению яркости и контраста

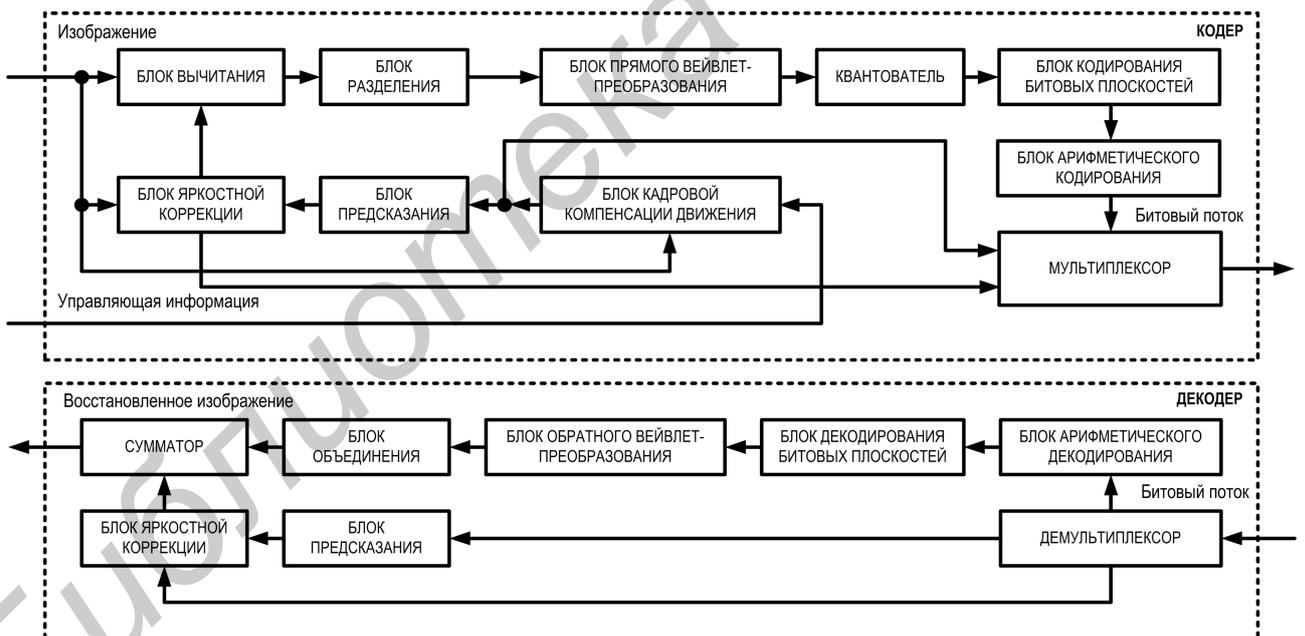


Рисунок 5. – Структурная схема кодека аэроизображений с кадровой компенсацией движения по фотоплану

Разработанный кодек обеспечивает восстановление контрастных по отношению к фону мелких объектов размером от 10x10 пикселей и более при сжатии аэроизображений до 1000 раз, в то время как H.264 примерно до 250 раз. Это позволяет уменьшить требуемую пропускную способность канала передачи изображений приблизительно в 4 раза при сохранении качества восстановления аэроизображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Разработаны методы, алгоритмы и программные средства кодирования аэроизображений в системах циклического видеомониторинга земной поверхности, основанные на кадровой компенсации движения по фотоплану и сопоставлении изображений по угловым идентификаторам прямых линий.

1 Разработан масочно-фазовый метод локализации прямых линий на изображении, основанный на библиотеке бинарных масок и пространственно-ориентированном преобразовании Хафа. Установлено, что данный метод обеспечивает сокращение вычислительной сложности локализации в 3,6 раза, уменьшение вероятности ложной локализации на 43 %, повышение устойчивости результатов локализации на 12 % к изменению яркости, на 22 % к изменению контраста и более чем на 35 % к зашумлению изображения по сравнению с методом Хафа [1].

2 Разработан метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов на изображениях, основанный на определении длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственной ориентации. Показано, что по сравнению с методами SURF/RANSAC предложенный метод обеспечивает увеличение устойчивости на 8 % к изменению яркости в пределах от -90% до -50% и от $+75\%$ до $+90\%$, повышение устойчивости на 25–55 % и 15–30 % к изменению контраста в пределах от -99% до -20% и от $+40\%$ до $+99\%$ соответственно, увеличение быстродействия на 20 % [4].

3 Разработан алгоритм кадровой компенсации движения на основе фотоплана для сжатия аэроизображений в системе циклического видеомониторинга наземных объектов. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает уменьшение ошибки предсказания прогнозируемого изображения в 5,3 раза по сравнению с алгоритмом блочной компенсации движения [2].

4 Разработан алгоритм кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану. Показано, что при коэффициентах сжатия более 10 предложенный алгоритм обеспечивает увеличение отношения пикового значения сигнала к шуму на 1дБ по сравнению с алгоритмом сжатия H.264 и на 2 дБ по сравнению с алгоритмом MJPEG-2000 [3].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

1 Разработанные алгоритмы кодирования перекрывающихся изображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану и угловой локализации и параметризации реперов использованы при разработке структуры и программных средств кодека для сжатия аэроизображений в системах циклического видеомониторинга земной поверхности. Показано, что в данных условиях применения за счет исключения повторного кодирования и передачи областей соответствия изображений и фотоплана разработанный кодек на основе кадровой компенсации движения позволяет увеличить отношение пикового значения сигнала к шуму на 1 дБ и более в зависимости от ориентации видеокамеры и коэффициента сжатия изображений [3].

2 Показано, что для ускорения процесса локализации прямых линий на изображении необходимо использовать прогрессивную локализации прямых на основе ориентированного преобразования Хафа, обеспечивающую уменьшение вычислительной сложности примерно до 10 раз для изображений размером 640x480 пикселей [5].

3 Показано, что разработанный кодек обеспечивает увеличение отношения пикового значения сигнала к шуму на величину до 3,5 дБ при коэффициентах сжатия 50 и более. Разработанный кодек обеспечивает восстановление контрастных по отношению к фону мелких объектов размером 10x10 пикселей при сжатии аэроизображений до 1000 раз. Это позволяет за счет использования разработанного кодека вместо H.264 уменьшить требуемую пропускную способность канала передачи изображений приблизительно в 4 раза при сохранении качества восстановления аэроизображений [3, 15].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Журавлёв, А.А. Масочно-фазовый метод локализации прямых линий на изображении / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Информатика. – 2014. – С. 85–96.
2. Журавлёв, А.А. Кадровая компенсация движения видеокамеры на основе фотоплана / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2014. – № 1 (79). – С. 5–10.
3. Журавлёв, А.А. Сжатие аэрокосмических изображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2014. – № 3 (44). – С. 105–109.
4. Журавлёв, А.А. Пространственно-ориентированная угловая локализация и параметризация реперов на изображениях / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Доклады БГУИР. – 2014. – № 7 (85). – С. 32–37.

Статьи в сборниках и материалах конференций

5. Журавлёв, А.А. Прогрессивная локализация прямых на изображениях с использованием ориентированного преобразования Хафа / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных : материалы Междунар. науч.-техн семинара, Минск, январь–декабрь 2011 г. / БГУИР. – Минск, 2011. – С. 74–81.
6. Al-Juboori, T.M. Fast localization of straight lines on the image based on oriented Hough transform / T.M. Al-Juboori, J.M. Nashaat, A.A. Zhuravlyov // The 2nd International Scientific Conference on Information Technology, Foundation of Technical Education, College of Management-Baghdad-Iraq, – 28–29 Nov. 2012 – P. 28–42.
7. Журавлёв, А.А. Ориентация аэрокосмических изображений на основе фазовых гистограмм прямых линий / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков, О.Дж. Аль-Фурайджи // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2013): материалы XII Междунар. конф. Минск, 20 ноября 2013 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск 2013. – С. 134–139.
8. Zhuravlyov, A. Formation of a steady against change of light reference structures based on guide lines / A. Zhuravlyov, V. Tsviatkou // Prospects of development of modern information and communication technologies: – proc. of the

International scientific and technical conf., Baku, 22–24 September 2011 / Azerbaijan Technical University. – Baku, – 2011. – P. 611–615.

Тезисы докладов на научных конференциях

9. Журавлёв, А.А. Метод селективной защиты подвижных изображений на основе неравномерного шифрования видеопотока / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Технические средства защиты информации : тез. докл. VIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Браслав, 24-28 мая 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 37.

10. Журавлёв, А.А. Использование реперных линий для повышения эффективности сжатия видеоданных на основе внешней калибровки камеры / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: тез. докл. Междунар. науч.-техн. семинара, Браслав, 20–24 сентября 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 47–48.

11. Журавлёв, А.А. Анализ бортовых систем видеофиксации для охраны распределенных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // Технические средства защиты информации: тез. докл. X Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск 29–30 мая 2012 г. / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 56.

12. Сжатие видеоданных воздушного циклического мониторинга на основе кадровой компенсации движения по фотоплану / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков, А.С. Аль-Алем, В.К. Конопелько // Технические средства защиты информации: Тез. докл. XI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5–6 июня 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2013. – С. 80.

13. Защита данных от несанкционированного доступа в бортовой памяти беспилотного летательного аппарата на основе деструктуризации / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков, Ф.А.-К.М. Аль Хелли, М.Х. Салек // Технические средства защиты информации: тез. докл. XII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 42–43.

14. Журавлёв, А.А. Формирование устойчивых к изменению освещенности реперных структур аэрокосмических изображений на основе направляющих / А.А. Журавлёв, В.Ю. Цветков // 5-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: тез. докл., Минск, 25–26 мая 2011 г. / Минск, 2011. – С. 112–114.

Патент

15. Кодек аэрокосмических изображений с кадровой компенсацией движения по фотоплану: пат. 9990 Респ. Беларусь / В.К. Конопелько, В.Ю. Цветков, А.А. Журавлёв, К.А. Волков, А.С. Войтенков, С.В. Гашков. – заявка № u20130650; заявл. 02.08.2013 // Нац. центр интеллектуальной собственности.

Библиотека БГУИР

РЭЗЮМЭ

Жураўлёў Аляксандр Аляксандравіч КАДЗІРАВАННЕ АЭРАВІДАРЫСАЎ НА АСНОВЕ КАДРАВЫЙ КАМПЕНСАЦЫЙ РУХУ ПА ФОТАПЛАНУ

Ключавыя словы: кадзіраванне аэравідарысаў, кадравая кампенсацыя руху па фотоплану, лакалізацыя прамых ліній, вуглавая ідэнтыфікатары.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка метадаў і сродкаў кадзіравання аэравідарысаў на аснове кадравай кампенсацыі руху па фотоплану і супастаўлення відарысаў з фотапланам па вуглавым ідэнтыфікатарам прамых ліній.

Даследаваны метады кадзіравання відэададзеных і ўплыў руху камеры на каэфіцыент сціску. Устаноўлена, што вядомыя метады кадзіравання, якія выкарыстоўваюць прадказанне па апорным кадры на аснове блочнай кампенсацыі руху, не эфектыўныя для цыклічнага відэаманіторынгу на базе беспілотных лятальных апаратаў (БЛА). Паказана, што каэфіцыент сціску можа быць павялічаны за кошт выкарыстання фотоплана трасы пралёта БЛА ў якасці апорнага відарыса. Для павышэння каэфіцыента сціску распрацаваны алгарытм кадавання аэравідарысаў на аснове кадравай кампенсацыі руху, які забяспечвае павелічэнне адносін пікавага значэння сігнала да шуму ў параўнанні з алгарытмам H.264 на 1дБ і ў параўнанні з алгарытмам MJPEG 2000 на 2дБ. Для павышэння эфектыўнасці сумажчэння аэравідарысаў з фотапланам распрацаваны метады прасторава-арыентаванай вуглавой лакалізацыі і параметрызацыі рэпераў, заснаваны на вызначэнні даўжынь і вуглоў перасячэння прамых кантурных ліній з улікам іх прасторавай арыентацыі, які забяспечвае інварыянтнасць ідэнтыфікацыйных параметраў рэпераў да павароту і маштабіравання відарыса і іх устойлівасць да змены яркасці на 8 % і больш, а кантрасту на 15 % і больш. Для павышэння эфектыўнасці лакалізацыі прамых ліній ва ўмовах павелічэння ўзроўню шуму распрацаваны масачна-фазавы метады лакалізацыі, заснаваны на бібліятэцы бінарных масак і прасторава-арыентаваным пераўтварэнні Хафа. Распрацаваны метады дазваляе больш чым на 35 % павысіць устойлівасць лакалізацыі прамых ліній да шуму ў параўнанні з пераўтварэннем Хафа.

На аснове прапанаваных метадаў і алгарытмаў распрацаваны кодэк для сціску аэрамалюнкаў з кампенсацыяй руху па фотоплану. Вынікі дысертацыйнай працы ўкаранёны на прадпрыемстве ААТ «Конструкторское бюро «Дисплей».

РЕЗЮМЕ

Журавлёв Александр Александрович

КОДИРОВАНИЕ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КАДРОВОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПО ФОТОПЛАНУ

Ключевые слова: кодирование аэроизображений, кадровая компенсация движения по фотоплану, локализация прямых линий, угловые идентификаторы.

Целью работы является разработка методов и средств кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения по фотоплану и сопоставления изображений с фотопланом по угловым идентификаторам прямых линий.

Исследованы методы кодирования видеоданных и влияние движения камеры на коэффициент сжатия. Установлено, что известные методы кодирования, использующие предсказание по опорному кадру на основе блочной компенсации движения, не эффективны в условиях циклического видеомониторинга на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Показано, что коэффициент сжатия аэроизображений может быть увеличен за счет использования фотоплана трассы пролета БЛА в качестве опорного изображения. Для повышения коэффициента сжатия разработан алгоритм кодирования аэроизображений на основе кадровой компенсации движения, обеспечивающий увеличение отношения пикового значения сигнала к шуму по сравнению с алгоритмом H.264 на 1дБ и по сравнению с алгоритмом MJPEG 2000 на 2дБ. Для повышения эффективности совмещения аэроизображений с фотопланом разработан метод пространственно-ориентированной угловой локализации и параметризации реперов, основанный на определении длин и углов пересечения прямых контурных линий с учетом их пространственной ориентации, обеспечивающий инвариантность идентификационных параметров реперов к повороту и масштабированию изображения и их устойчивость к изменению яркости на 8 % и более, контраста на 15 % и более. Для повышения эффективности локализации прямых линий в условиях зашумленности разработан масочно-фазовый метод локализации, основанный на библиотеке бинарных масок и пространственно-ориентированном преобразовании Хафа. Разработанный метод позволяет более чем на 35 % повысить устойчивость локализации прямых линий к шуму по сравнению с преобразованием Хафа.

На основе предложенных методов и алгоритмов разработан кодек для сжатия аэроизображений с кадровой компенсацией движения по фотоплану. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ОАО «Конструкторское бюро «Дисплей».

SUMMARY

Alexandr Zhuravlyov

CODING OF AEROIMAGES BASED ON FRAME MOTION COMPENSATION BASED ON PHOTOMAP

Keywords: coding of aero images, frame motion compensation based on photomap, localization of straight lines, angular identifiers.

The aim is to develop methods and means of encoding aero images based on frame motion compensation based on photomap and image matching with photomap on angular identifiers of straight lines.

The methods of encoding of video data and its influence on the compression ratio were investigated. It was found that the known coding methods which use reference frame prediction based on block motion compensation are not effective for cyclic video monitoring with unmanned aerial vehicles (UAVs). It is shown that the compression ratio can be increased by using the photomap of UAV flight route as a reference picture. The algorithm of coding of aeroimages based on frame motion compensation was developed to improve the compression ratio. It increases the PSNR up to 1dB compared with the method H.264 and up to 2dB compared with the method MJPEG 2000. To enhance the effectiveness of combining of aeroimages with photomap a method of spatially-oriented angular localization and parameterization of points of interest was developed. It's based on the determination of the lengths and angles of intersection of contour lines based on their spatial orientation, providing invariance identification parameters of frames to rotate and scale images and their resistance to change in the brightness 8 % or more, the contrast of 15 % or more. To improve the efficiency of localization of straight lines in noisy conditions the mask-phase method of localization was designed. It's based on a library of binary masks and spatially-oriented Hough transform. The developed method allows to increase more than 35 % in stability of the results of localization of straight lines in terms of noise compared to the Hough transform.

The codec for compression of aeroimages based on frame motion compensation based on photomap was developed. The results of the thesis are introduced at JSC "Design Bureau" Display ".

Научное издание

Журавлёв Александр Александрович

**КОДИРОВАНИЕ АЭРОИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КАДРОВОЙ
КОМПЕНСАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПО ФОТОПЛАНУ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Подписано в печать 13.04.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 60 экз. Заказ 118.

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