

На правах рукописи

Казаков Борис Борисович

**Комбинированные алгоритмы оперативного  
выделения движущихся объектов в  
последовательности видеокадров на основе  
локального дифференциального метода  
вычисления оптического потока**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном  
электротехническом университете «ЛЭТИ».

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент,  
Ивановский Сергей Алексеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор,  
Куприянов Михаил Степанович.  
кандидат технических наук,  
доцент,  
Макулов Василий Борисович.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций им.  
проф. М.А.Бонч-Бруевича.

Защита состоится 23 декабря 2009 г. в \_\_\_\_ часов на заседании совета по  
защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.01 при Санкт-  
Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ»,  
расположенном по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора По-  
пова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского  
государственного электротехнического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций,  
к.т.н., доцент

М. Г. Пантелеев

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы** Системы видеонаблюдения находят широкое применение в задачах борьбы с терроризмом, охраны объектов, мониторинга дорожного движения. Эти задачи являются чрезвычайно актуальными и затрагивают многие стороны жизни человека.

С появлением дешевых цифровых видеорегистраторов стало возможным обрабатывать измерительные данные при помощи компьютера, что привело к появлению широкого спектра новых задач в цифровой обработке сигналов. Примерами таких задач являются охрана периметра и внутренней территории объекта, обнаружение и распознавание лиц, распознавание движения, слежение за спортивными мероприятиями.

В данной работе исследуется задача выделения движущихся объектов в последовательностях видеокадров. Разработанные автором алгоритмы и их программная реализация представляют интерес для организаций, занимающихся обеспечением безопасности на предприятиях, складах, вокзалах и предотвращением террористических актов. Для организации видеонаблюдения требуется большое количество видеокамер. В результате имеет место интенсивный поток измерительной информации, и для его анализа требуются эффективные и экономные алгоритмы автоматизированного анализа.

Появление параллельных графических процессоров, позволяющих выполнять научные расчеты, делает актуальной задачу разработки эффективных и устойчивых параллельных алгоритмов, выполняющихся на графическом процессоре и позволяющих автоматизировать выделение движущихся объектов в видеопоследовательности высокой четкости в реальном масштабе времени. Такие алгоритмы могут использоваться как для анализа измерительной информации, полученной с обзорной видеокамеры высокой четкости, так и для параллельной обработки информации с нескольких следящих или обзорных видеокамер низкого или среднего разрешения.

Современные методы анализа последовательностей видеокадров основаны на методах выделения движения. Полученную информацию о движении можно использовать для дальнейшего анализа, комбинируя ее со статическими данными отдельных кадров. Движение характеризует оптический поток (ОП), который является оценкой перемещения пикселей от кадра к кадру. Для вычисления оптического потока наиболее часто используются локальные и глобальные дифференциальные алгоритмы. Локальные дифференциальные алгоритмы позволяют достаточно быстро вычислить оптический поток, но точность полученного ОП в некоторых случаях является недостаточной для устойчивого выделения движущихся объектов. Глобальные методы вычисления ОП являются более точными, но их вычислительная сложность не позволяет их использовать в некоторых задачах реального времени. Поэто-

му разработка точных вычислительно эффективных алгоритмов вычисления ОП, а также алгоритмов, обеспечивающих надежное оперативное выделение движущихся объектов в реальном масштабе времени на основе ОП, и создание параллельной программной реализации разрабатываемых алгоритмов являются актуальными задачами.

Исследование и разработка алгоритмов обработки видеоданных, как правило, требует проведения трудоемкого вычислительного эксперимента на модельных и реальных данных большого объема. Поэтому важно корректно организовать вычислительный процесс при модификации и тестировании алгоритмов. Таким образом, создание программной визуальной инструментальной системы, позволяющей частично автоматизировать организацию вычислительного процесса, также является актуальной задачей.

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритмов и программ, позволяющих устойчиво выделять движущиеся объекты и оценивать их параметры в последовательностях видеокадров в режиме реального времени. При этом целевой аппаратной платформой является персональный компьютер с установленным графическим процессором. Разработанные алгоритмы должны быть вычислительно эффективными и устойчивыми.

Основные задачи работы:

1. Разработка алгоритма вычисления оптического потока, позволяющего вычислять оптический поток в режиме реального времени за счет параллельной обработки и обладающего свойством устойчивости (робастности) относительно возмущений входных данных.
2. Разработка комбинированных алгоритмов и программной реализации выделения движущихся объектов на неподвижном и малоподвижном фоне на основе совместного анализа полученных оценок оптического потока и статических признаков в отдельном кадре.
3. Разработка алгоритмов и программных средств, позволяющих выделять движущиеся объекты в осложненных условиях съемки, в том числе быстро движущиеся одиночные объекты в условиях сильного зашумления, а также множественные объекты в условиях резкого изменения яркости отдельных фрагментов динамической сцены.
4. Разработка параллельной программной реализации алгоритмов на графическом ускорителе.
5. Разработка программной инструментальной системы визуальной реализации и испытания алгоритмов обработки видеокадров, позволяющая интерактивно модифицировать исследуемые алгоритмы и анализировать их поведение на модельных или реальных входных данных, а также исследовать реализованные на графическом процессоре алгоритмы.

**Методы исследований** базируются на методах организации вычислитель-

ных процессов и компьютерных экспериментов по испытанию и исследованию алгоритмов, на методах вычислительной математики и статистического оценивания, на методах решения некорректных задач, на методах преобразований и анализа изображений.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Совместное использование регуляризованных оценок и медианой фильтрации в комбинированном мультимасштабном локальном алгоритме вычисления оптического потока, обеспечивающее повышение точности и устойчивость полученных оценок.
2. Разработка эффективных комбинированных алгоритмов выделения движущихся объектов на основе совместного анализа оптического потока и статических признаков отдельного кадра.
3. Параллельное представление и программная реализация разработанного алгоритма вычисления оптического потока, ориентированное на выполнение на графическом процессоре.
4. Адаптация алгоритмов выделения движущихся объектов к осложненным условиям наблюдения: а) на основе линейной модели движения высокоскоростных объектов на подвижном фоне в условиях сильного зашумления, б) на основе модели импульсного изменения яркости объектов динамической сцены.
5. Смешанное визуально-текстовое представление алгоритмов, интерактивная коррекция и организация вычислительного процесса в программной инструментальной системе реализации и испытания алгоритмов обработки видеок кадров.

**Практическая значимость** Программная реализация предложенных параллельных алгоритмов выделения движущихся объектов на основе оптического потока может успешно применяться в задачах охраны периметра и территории объектов благодаря возможности обработки поток видеоизмерений с нескольких измерительных устройств. Применение быстрых алгоритмов вычисления оптического потока позволяет обрабатывать измерения в режиме реального времени, а в режиме постобработки существенно повысить оперативность анализа данных. Разработанные алгоритмы выделения движущихся объектов, адаптированные к осложненным условиям наблюдения в некоторых реальных задачах (быстрое по сравнению с темпом регистрации данных движение, сильное зашумление, значительное изменение яркости объектов динамической сцены), оказываются работоспособными в тех случаях, когда существующие стандартные алгоритмы не дают надежных результатов. Программная реализация разработанных алгоритмов вычисления оптического потока на параллельном графическом процессоре может при-

меняться во многих задачах: при сжатии и передаче видеоинформации, в робототехнике и стереозрении, в задачах идентификации личности.

Разработанная программная инструментальная система визуальной реализации исследования алгоритмов может быть использована для различного рода испытаний алгоритмов, обрабатывающих последовательности многомерных данных, в том числе алгоритмов, выполняющихся на графическом процессоре.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Комбинированный мультимасштабный регуляризованный устойчивый алгоритм вычисления оптического потока.
2. Алгоритмы выделения движущихся объектов на основе оценок оптического потока, в том числе быстродвижущихся объектов при большой зашумленности видеок кадров и множественных объектов при импульсном изменении яркости.
3. Параллельная реализация разработанных алгоритмов.
4. Программная инструментальная система визуальной реализации и испытания алгоритмов обработки видеоданных.

**Внедрение работы.** Результаты работы были использованы в НИР, проводимой в ОАО «НИЦ ЭТУ», и использованы в учебном процессе кафедры МО ЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

**Апробация работы.** Основные положения, результаты исследований и выводы, содержащиеся в диссертационной работе, обсуждались в широком кругу специалистов, ученых и разработчиков систем слежения в УНИЦ ПСКС «ЛЭТИ», на конференциях ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а также на научно-технических конференциях:

1. «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», г. Санкт-Петербург, 2007 г.
2. VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 2009 г.
3. «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам», г. Санкт-Петербург, 2009 г.
4. «Информационно-измерительное обеспечение полигонных (космодромных) испытаний вооружения и военной техники». г. Великий Новгород, 28-30 июня 2006 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 5 научных работ, из них 3 - статьи, 2 - работы в материалах конференций. 2 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий (ВАК).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав с выводами, заключения, одного приложения и списка литературы, включающего 102 наименования. Основная часть работы изложена на 112 страницах машинописного текста и содержит 67 рисунков.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** проведен анализ состояния проблемы выделения оптического потока и выделения объектов на основе вычисленного оптического потока. Сформулированы основные недостатки существующих методов с точки зрения задачи слежения за объектами в реальном времени в видеопоследовательности высокой четкости.

В работе сделано предположение, что видеопоследовательность  $\mathbf{S}$  представляет собой последовательность видеок кадров  $(\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_k)$ , зарегистрированных через равные промежутки времени  $\Delta t = 1$ . Каждый видеок кадр описывается в виде массива данных  $\mathbf{I}$  размерности  $(p \times q)$ . Интенсивность кадра в точке с координатами  $\mathbf{x} = (x, y)^T$  равна  $\mathbf{I}(\mathbf{x}) = \mathbf{I}(x, y)$ . Дискретные точки видеок кадра будем называть пикселями.

Оптическим потоком будем называть поле двумерных векторов  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1, f_2)^T = (u, v)^T$ , вычисленных в каждой точке изображения  $\mathbf{x}$ . Оптический поток является оценкой поля перемещения пикселей и основывается на уравнении неразрывности потока пикселей:

$$\frac{\partial \mathbf{I}}{\partial t} + \mathbf{f}^T \nabla \mathbf{I} = 0,$$

где для частных производных использованы обозначения  $\frac{\partial I}{\partial t} = I_t$ ,  $\nabla I = (I_x, I_y)$ ,  $\frac{\partial I}{\partial x} = I_x$ ,  $\frac{\partial I}{\partial y} = I_y$ .

Пусть для заданной окрестности  $\Omega(\mathbf{x})$  определено преобразование множества точек окрестности  $\{x_{ij} | x_{ij} \in \Omega(\mathbf{x})\}$  в вектор  $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$  и обратно:  $\{\mathbf{x}_{ij} | \mathbf{x}_{ij} \in \Omega(\mathbf{x})\} \Leftrightarrow \mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ .

Введем вектор  $\mathbf{H} = [\nabla I(z_1), \nabla I(z_2), \dots, \nabla I(z_m)]^T$  размера  $(m \times 2)$  и вектор  $\mathbf{B} = -(I_t(z_1), I_t(z_2), \dots, I_t(z_m))$  размера  $(m \times 1)$ . Тогда оценка оптического потока по методу наименьших квадратов получается минимизацией функционала:

$$\|\mathbf{e}\|_2^2 = \mathbf{J} = (\mathbf{H}\mathbf{f} - \mathbf{B})^T \mathbf{W} (\mathbf{H}\mathbf{f} - \mathbf{B}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{W}$  — весовая матрица, определяемая окрестностью. Такая оценка соответствует локальному методу оценивания оптического потока, в отличие

от глобальных методов, в которых минимизируемый по всему изображению функционал содержит дополнительное слагаемое, обеспечивающее сглаживающий эффект для вычисленного оптического потока. Глобальные методы являются более точными, но при этом вычисление оптического потока является более трудоемким. Анализ производительности глобальных методов показал их неприменимость для вычисления оптического потока видеопоследовательности высокой четкости в реальном времени.

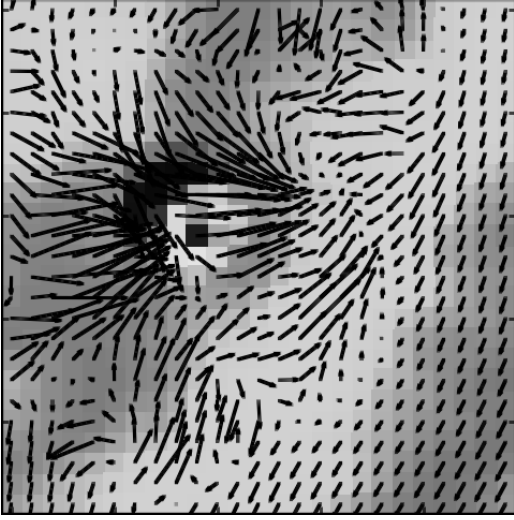
Методы вычисления оптического потока подвержены так называемой «апертурной» проблеме, которая вызвана масштабным рассогласованием: уровни яркости изменяются на больших масштабах, чем использовали операторы при определении градиента. Эффективная обработка требует представления изображений на разных масштабах. Поэтому, для вычисления оптического потока используются мультимасштабные методы: оценка оптического потока, полученная на грубом масштабе, интерполируется на предыдущий уровень и уточняется путем анализа видеокadres соответственного уровня. Все современные методы вычисления оптического потока используют мультимасштабное представление видеокadres.

**Во второй главе** предложены модификации локальных методов вычисления оптического потока. Локальные методы вычисления оптического потока были выбраны из-за их высокой производительности и необходимости их распараллеливания.

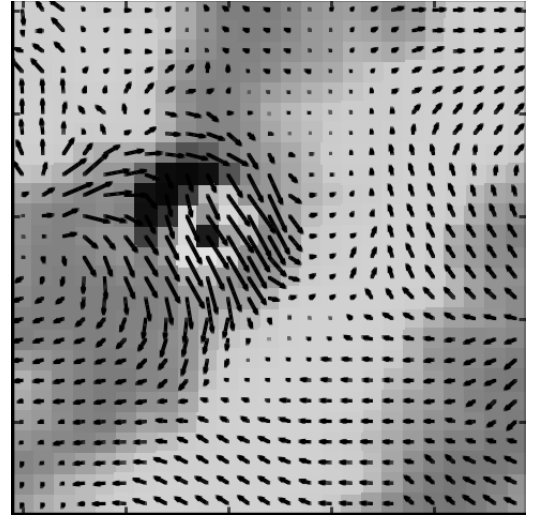
Проанализированы причины неточности локальных оценок оптического потока, получаемых при минимизации функционала (1). К основным причинам относятся: а) в минимизируемом функционале (1) отсутствует сглаживающее слагаемое, б) матрица градиента  $\mathbf{H}$  вычисляется с ошибками, вызванными аппроксимацией частных производных операцией свертки, в) вектор временной производной  $\mathbf{V}$  вычисляется с ошибкой, которая тем больше, чем больше скорость движения объекта, г) условие постоянства вектора оптического потока в локальной области нарушается на границах движущихся объектов. Поэтому система (1) является неустойчивой, а задача вычисления оптического потока локальным методом является в общем случае некорректной.

Для преодоления этих недостатков предложено использовать три основные модификации: 1) взвешенные начальные оценки и методы регуляризации для получения устойчивого решения, 2) медианный фильтр в качестве аналога сглаживающей компоненты в глобальных методах вычисления ОП, 3) комбинированное использование первых двух модификаций в мультимасштабном методе вычисления ОП. В отличие от глобальных методов, использование данных модификаций позволяет вычислять оптический поток, решая систему нормальных уравнений небольшого размера. Полученные алгоритмы вычисления ОП поддаются распараллеливанию. При этом точность вычис-





(a) Исходное поле оптического потока



(b) Сглаженное поле оптического потока

Рис. 1: Результат медианной фильтрации поля оптического потока

ленного оптического потока незначительно уступает наиболее точным и более медленным алгоритмам вычисления глобального ОП и во многих случаях является достаточной для задач выделения движущихся объектов.

Первая модификация основана на методах решения некорректных задач и сводится к добавлению регуляризирующей компоненты  $\alpha^2 \|\mathbf{f}\|$  к минимизируемому функционалу:

$$\mathbf{J}_r = \left( \dot{\mathbf{V}} - \dot{\mathbf{H}}\mathbf{f} \right)^T \mathbf{W} \left( \dot{\mathbf{V}} - \dot{\mathbf{H}}\mathbf{f} \right) + \alpha^2 \|\mathbf{f}\|, \quad (2)$$

при этом  $\|\dot{\mathbf{H}} - \mathbf{H}\| \leq h, \|\dot{\mathbf{V}} - \mathbf{V}\| \leq \delta, \|\dot{\mathbf{H}} - \mathbf{H}\| \leq h, \left( \dot{\mathbf{V}} - \dot{\mathbf{H}}\mathbf{f} \right)^T \mathbf{W} \left( \dot{\mathbf{V}} - \dot{\mathbf{H}}\mathbf{f} \right) \leq \rho$ . Здесь  $\dot{\mathbf{H}}, \dot{\mathbf{V}}$  — измеряемые значения,  $\mathbf{H}, \mathbf{V}$  — истинные.

Тогда значение  $\alpha$  подбирается из соотношения  $\alpha = \beta \cdot k^{-1}(\dot{\mathbf{H}}^T \dot{\mathbf{H}})$ , где  $k(\dot{\mathbf{H}}^T \dot{\mathbf{H}})$  — число обусловленности матрицы  $\dot{\mathbf{H}}^T \dot{\mathbf{H}}$ ,  $\beta$  — глобальная константа, которая вычисляется на основе анализа остаточных невязок функционала (2), анализа характеристик точности  $h$  и  $\delta$ .

Вторая модификация заключается в применении медианного фильтра к вычисленному полю оптического потока в мультимасштабном алгоритме вычисления ОП. Медианный фильтр интерпретируется как аналог сглаживающего слагаемого в глобальных методах вычисления ОП, что обуславливает большой размер окна фильтра (порядка  $(25 \times 25)$ ). Результат медианной фильтрации поля оптического потока показан на рис. (1).

Комбинированный локальный дифференциальный алгоритм вычисления оптического потока получается путем совместного использования медианной фильтрации и регуляризованной оценки вектора ОП на каждом из уровней в мультимасштабном подходе. Показано, что в этом случае точность вычисленного поля оптического потока является наибольшей из всех предложенных

Метод	RB	G2	G3	HYD	U2	U3	YOS
Исходный алг.	23.31	19.65	20.96	24.65	46.69	35.99	12
Медианный	22.32	18.4	19.47	22.2	45.92	33.87	11.01
Регуляризованный	15.31	8.16	12.83	10.35	28.18	8.75	10.15
Комбинированный	14.92	7.62	12.46	10.47	26.7	12.35	8.2

Таблица 1: Интегральная ошибка вычисленного оптического потока для предложенных модификаций алгоритма.

модификаций.

Эффективность разработанного комбинированного алгоритма вычисления оптического потока подтверждена сравнением точности вычисленного оптического потока с использованием предложенных модификаций и без их использования. При этом использовались стандартные видеопоследовательности, разработанные в 2006 году группой американских ученых (Black и другие) для сравнения точности вычисления оптического потока различными методами. Результаты сравнения приведены в таблице 1. В среднем ошибка вычисления потока уменьшилась на 48%.

**В третьей главе** рассматриваются методы выделения движущихся объектов с использованием вычисленного поля оптического потока в качестве дополнительного признака. Отдельно рассматриваются два случая выделения движущихся объектов в неблагоприятных условиях съемки.

Рассматривается задача, в которой необходимо обрабатывать видеопоследовательность, полученную с обзорной видеокамеры. Особенностью такой видеопоследовательности является неподвижный фон и присутствие в последовательности множества движущихся объектов. Для выделения движущихся объектов предложено использовать следующую последовательность действий: вычисление поля оптического потока, определение поля признаков (например, модуля векторов оптического потока) с использованием поля оптического потока, статическая сегментация выбранной характеристики поля оптического потока.

Для получения устойчивого алгоритма выделения движущихся объектов наиболее важным является определить способ комбинирования поля оптического потока и поля интенсивности изображения и выбрать корректный алгоритм сегментации. Требования поставленной задачи (возможность выделять движущиеся объекты в реальном времени) сужает класс применимых алгоритмов сегментации.

В работе было предложено использовать мультипликативный и морфо-

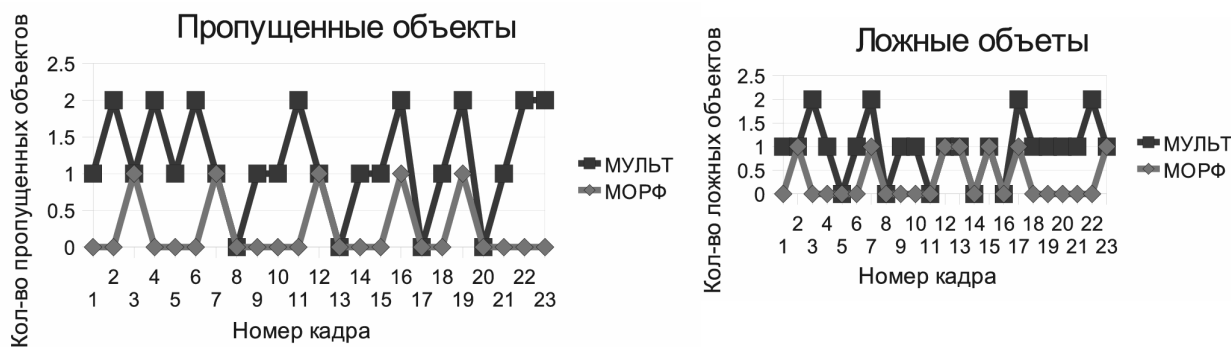


Рис. 2: Количество ложных и пропущенных объектов в зависимости от способа формирования поля признаков (МУЛЬТ — мультипликативный алгоритм вычисления поля признаков, МОРФ — морфологический алгоритм вычисления поля признаков).

логический подход к формированию поля признаков. Исследование алгоритмов на модельной видеопоследовательности показало, что при использовании морфологически сформированного поля признаков и пирамидального алгоритма сегментации достигается максимальная устойчивость выделения движущихся объектов. В мультипликативном подходе поле признаков  $\mathbf{C}$  вычисляется, как  $\mathbf{C} = \mathbf{I} \otimes \|\mathbf{f}\|$ , где  $\otimes$  обозначает поточечное умножение двух изображений. Морфологический подход использует последовательность морфологических операций эрозии, реконструирования, девальтации, реконструирования для получения поля признаков. На рис. 2 показано сравнение двух алгоритмов формирования поля признаков. При использовании морфологического алгоритма формирования поля признаков частоты пропусков объектов и появления ложных объектов существенно снизились.

В некоторых случаях методы выделения объектов, описанные выше, не позволяют надежно выделять объект в видеопоследовательности. Для двух таких частных случаев (далее — задачи 1 и 2) предлагается использовать модифицированные алгоритмы.

Задача 1: слежение за объектами в видеопоследовательности, полученной от следящей видеокамеры в условиях сильного зашумления кадров. Характеристики шума в этой последовательности затрудняют визуальную локализацию объектов оператором. В качестве априорных данных задаются начальные координаты объекта в плоскости кадра  $\mathbf{x}_1 = (x_1, y_1)^T$  и проекция вектора скорости объекта на плоскость кадра  $\mathbf{v}_1 = (vx_1, vy_1)^T$ . Также задан начальный радиус объекта  $\mathbf{R}_1 = (Rx_1, Ry_1)$ . Причем  $\mathbf{R}$  мало по сравнению со скоростью перемещения. Локальный оптический поток в данных условиях не отражает движение объекта, поэтому его нельзя использовать для выделения без дополнительной обработки.

Поэтому для выделения объекта предлагается использовать следующую

последовательность действий:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_n &= \mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{v}_{n-1} - \overline{\mathbf{F}}_{n-1}, \\ \mathbf{x}_n &= \hat{\mathbf{x}}_n + \max_{(dx, dy)^T} (\Omega(\mathbf{I}_{n-1}, \mathbf{x}_{n-1}) \star \Omega(\mathbf{I}_n, \mathbf{x}_n)) [dx, dy],\end{aligned}$$

где  $(\Omega_1 \star \Omega_2) [dx, dy] = \sum_{x=-Rx}^{Rx} \Omega_1 \sum_{y=-Ry}^{Ry} \Omega_1[x, y] \Omega_2[x+dx, y+dy]$  — кросс корреляция двух окрестностей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ ,  $\overline{\mathbf{F}}_{n-1}$  — средний вектор оптического потока по всему полю изображения,  $\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n$  — координаты и скорость объекта в момент времени  $n$ .

Задача 2: слежение за объектами в условиях импульсно меняющегося освещения. Предлагаемая модификация применяется в случаях, когда необходимо аппроксимировать изменение яркости изображения, вызванное «вспышкой» объекта. Современные методы компенсации изменения освещения позволяют выделять оптический поток в случаях, когда изменение освещения происходит относительно медленно. При вспышке объектов освещенность существенно изменяется при смене 2-х — 3-х видеокадров.

Для вычисления оптического потока в таких условиях предлагается компенсировать изменения освещенности, вызванные вспышками объекта. Пусть  $\hat{\mathbf{I}}_n = \mathfrak{W}(\mathbf{I}_{n-1}, \mathbf{f}_{n-1})$ . Если  $\sum_{\mathbf{x}} \left| \mathbf{I}_n(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{I}}_n(\mathbf{x}) \right| > \tau$ , то изменения освещенности при переходе от  $n-1$ -го к  $n$ -ому кадру необходимо компенсировать. Для этого предлагается вычислить аппроксимацию добавочной освещенности  $d\mathbf{I} = \mathbf{I}_n - \hat{\mathbf{I}}_n$ . Исследования показали, что если имеется информация о центрах «вспышек», то импульсное изменение освещенности можно моделировать в виде функции

$$dI(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N w_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|), \quad (3)$$

где  $\phi(r) = 1/\sqrt{(r/\varepsilon)^2 + 1}$  — радиальная базисная функция, а сумма 3-разложение на радиальные базисные функции. Для определения параметров  $w_i$  обычно используют метод наименьших квадратов, а для определения  $\mathbf{c}_i$  можно использовать имеющуюся априорную информацию о координатах вспышек или построить искусственную нейронную сеть.

**В четвертой главе** описывается программная инструментальная система (ИС) визуального исследования алгоритмов. Анализ существующих средств показал целесообразность создания собственной комбинированной визуальной инструментальной системы модификации и исследования алгоритмов на основе языка Python. Основными целями при этом было обеспечить: 1) удобное тестирование и анализ алгоритмов; 2) простоту модификации алгоритмов; 3) наглядное представление алгоритмов; 4) высокую скорость выполнения алгоритмов; 5) унифицированный адаптируемый пользовательский интерфейс; 6) возможность исследования реализации алгоритмов на графическом процессоре.

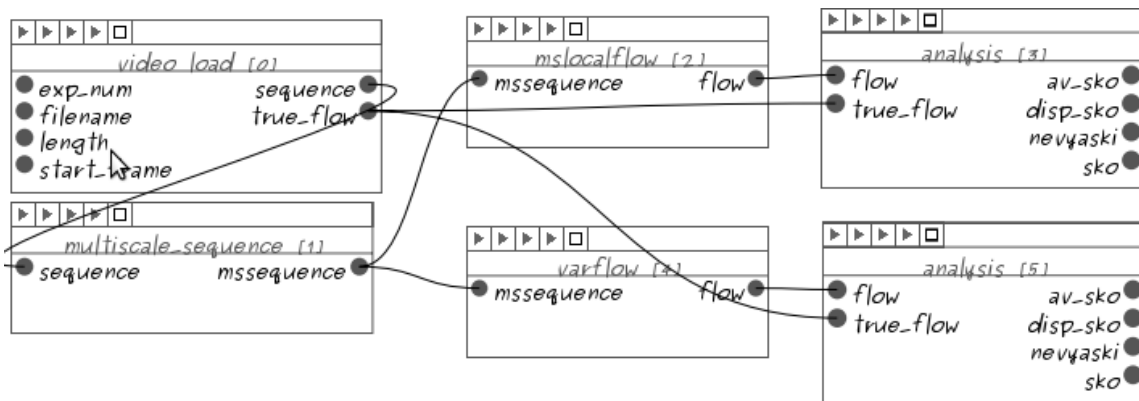


Рис. 3: Диаграмма алгоритма

Алгоритм в инструментальной системе представлен в виде диаграммы, которая представляет собой модифицированный информационный граф. Блоки соответствуют операциям над элементами, а связи описывают поток данных между блоками. Поведение блока в свою очередь может быть описано или другой диаграммой, или текстом программы на языке Python. Возможность интерактивного определения алгоритма поведения блока с помощью скрипта определяет ключевое отличие комбинированного средства от целиком визуальных средств программирования. Каждый блок имеет набор входных и набор выходных параметров. Связь между двумя блоками определяет соответствие значения выходного параметра одного блока входному параметру другого блока. Выполнение диаграммы состоит из последовательности выполнения блоков. При этом порядок выполнения определяется связями между блоками. Инструментальная система поддерживает режим «ленивых вычислений», т.е. при выполнении диаграммы выполняются только те операторы, значения результатов которых интересуют пользователя. Пример визуальной диаграммы показан на рис. 3.

Представление алгоритма в виде диаграммы позволяет организовать вычисления таким образом, что после внесения необходимых изменений не изменившиеся части диаграммы/алгоритма не перевычисляются, а вычисляются только блоки с изменившимися данными.

Основные преимущества данной ИС заключаются в комбинированной визуально-текстовой семантике диаграммы алгоритма, повышающей наглядность и структурированность внесения модификаций и исследования их влияние на поведения алгоритма, и в более гибкой модели вычислений, которая в некоторых случаях может сократить время исследования алгоритма.

**В пятой главе** описываются особенности практической реализации разработанных методов и алгоритмов выделения объектов на параллельных процессорах. При этом в качестве целевой аппаратной платформы для реализации алгоритмов использовался графический процессор и язык программиро-

вания графических процессоров CUDA.

Рассмотрим предложенные алгоритмы с точки зрения их реализации на графическом сопроцессоре. Регуляризованный мультимасштабный алгоритм состоит из следующих базовых операций: вычисление градиента (свертка), деформация массива градиента для учета начальных оценок, перемножение и сглаживание (свертка), вычисление критерия доверия, вычисление уточненного вектора оптического потока, медианная фильтрация. С точки зрения параллельной модели выполнения, большинство перечисленных операций являются поточечными в пространстве кадров, поэтому легко могут быть разделены на произвольное количество нитей (вплоть до одной нити на один пиксель). Существенные затруднения вызвала эффективная реализация медианного фильтра из-за большого размера используемого ядра, поскольку тривиальная реализация требовала бы большего количества обращений к видеопамяти, что могло существенно снизить производительность алгоритма вычисления ОП в целом. Для создания эффективной реализации медианного фильтра на графическом процессоре вычислительный процесс был организован следующим образом: а) изображение разбивалось на прямоугольные области по количеству блоков на графическом процессоре, б) для уменьшения обращений к медленной видеопамяти максимально возможное число элементов перемещалось в быструю разделяемую память блока, в) проводилась фильтрация скользящими медианными фильтрами элементов из разделяемой памяти, г) когда все элементы из разделяемой памяти блока обработаны, происходил новый обмен элементами между видеопамятью в разделяемой памятью блока.

**В шестой главе** описываются постановка вычислительного эксперимента. Основные цели эксперимента: сравнение точности вычисления оптического потока предложенным алгоритмом с существующими на сегодняшний день, сравнение скорости выполнения предложенных алгоритмов вычисления с существующими на сегодняшний день, оценка пригодности предложенных методов к выделению объектов, иллюстрация предложенных модификаций алгоритмов выделения объектов и оценка границ их применимости.

Сравнение скорости вычислений с некоторыми современными алгоритмами вычисления оптического потока показано в таблице 2. Все вычисления проводились на графическом ускорителе (NVIDIA GTX 275). TVL1 — глобальный вариационный метод, Number-L1 — модифицированный TVL1 метод, в котором метрика TV заменена на метрику H1 для более точного определения границ объектов, комбинированный — предложенный в работе метод. Методы TVL1 и Number-L1 описаны в первой главе диссертации.

Сравнение ошибок вычислений с теми же алгоритмами вычисления оптического потока показано в таблице 3. При этом использовались стандартные видеопоследовательности, разработанные в 2006 году группой американских

размер изображения	TVL1	Number-L1	Комбинированный
512 × 512	5.3	1.3	121
1024 × 1024	1.3	0.25	32
2048 × 2048	0.33	0.05	8

Таблица 2: Скорость вычисления оптического потока различными алгоритмами (в кадрах/сек)

метод	RBW	GV2	GV3	Hydr	U2	U3	vos
комбинированный	14.92	7.62	12.46	10.47	26.7	12.35	8.2
TVL1	11.41	4.12	10.75	14.85	23.35	18.77	4.74
Number-L1	7.18	2.14	5.14	6.17	15.9	7.42	2.32

Таблица 3: Сравнение разработанного алгоритма с современными глобальными алгоритмами вычисления оптического потока по величине интегральной ошибки

ученых (Black и другие) для сравнения точности вычисления оптического потока различными методами.

Анализ результатов измерений, представленный в таблицах 1, 2, 3 показывает, что при использовании комбинированного метода вычисления оптического потока ошибка вычислений уменьшается на 48% по сравнению с локальным дифференциальным методом, и увеличивается на 138% по сравнению с глобальными методами. При этом скорость работы разработанного метода приблизительно в 20 раз превышает скорость работы глобальных методов вычисления оптического потока, и почти не уступает немодифицированным локальным методам.

Для проведения сравнения алгоритмов выделения движущихся объектов были использованы модельные и реальные видеопоследовательности. По основным характеристикам (уровень шума, освещенность, размер объектов, скорость перемещения) модельные последовательности соответствовали реальным.

**В заключении** сформулированы основные научные и практические результаты, полученные автором.

### Основные результаты работы

1. Разработан новый алгоритм вычисления потока, позволяющий вычислять оптический поток в реальном масштабе времени с достаточной степенью точности, ориентированный на реализацию на ПК с графическим устройством среднего уровня.
2. Разработан алгоритм выделения объектов на основе разработанного алгоритма вычисления оптического потока.

3. Разработаны два алгоритма выделения объектов в осложненных условиях съемки: а) в условиях сильного зашумления видеокадров, б) в условиях импульсного изменения яркости.
4. Предложена параллельная реализация разработанного алгоритма вычисления оптического потока, ориентированная на вычисление оптического потока на графическом ускорителе.
5. Разработана программная инструментальная система визуального исследования и испытания алгоритмов обработки больших объемов видеоданных.

### **Опубликованные научные работы по теме диссертации в изданиях, определенных ВАК**

1. Ивановский, С. А. Методы семантического сжатия последовательностей изображений, полученных с оптико-электронных измерительных средств / С. А. Ивановский, Б. Б. Казаков, А. Е. Лозицкий // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». — 2006. — Вып. 3. — С. 15-20
2. Казаков, Б. Б. Эффективные методы выделения движения объектов в последовательности изображений / Б. Б. Казаков, С. А. Ивановский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2009 — Вып. 5. — С. 55 — 60

### **и в других научных изданиях**

3. Казаков Б. Б. Методы предварительной обработки и сегментации, ориентированные на сжатие последовательностей полутоновых изображений / Б. Б. Казаков, С. А. Ивановский, А. Е. Лозицкий // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». — 2007. — Вып. 1. — С. 10-17
4. Казаков Б. Б. Программная система сегментации изображений / Б. Б. Казаков // Сборник трудов конференции молодых ученых. Сер. «Информационные технологии» — 2009. — Вып. 6. — с. 694-699
5. Казаков, Б. Б. Программное средство выделения подвижных объектов на неподвижных изображениях. / Б. Б. Казаков // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: Материалы межвузовского конкурса – конференции студентов аспирантов и молодых учёных Северо-Запада. — 2007. — С. 39 — 40