

На правах рукописи

Курманбек уулу Талантбек

**ОБНАРУЖЕНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ
КООРДИНАТ ДВИЖУЩИХСЯ ТОЧЕЧНЫХ
ОБЪЕКТОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2009

Работа выполнена в Институте автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Киричук Валерий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Резник Александр Львович

кандидат технических наук
Поташников Анатолий Кириллович

Ведущая организация Институт вычислительной математики и
математической геофизики СО РАН

Защита диссертации состоится «___» _____ 2009 года в ___ ч. ___ мин.
на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Институте автоматики
и электрометрии СО РАН по адресу: Россия, 630090, Новосибирск, проспект
Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматики и
электрометрии СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2009 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико–математических наук

Насыров К.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие технических средств наблюдения и обработки данных позволило решать задачи автоматического анализа состояния объектов, информация о которых представлена в виде изображений. Во многих отраслях науки и техники возникает проблема обнаружения объектов, размеры которых находятся на пределе пространственного разрешения системы регистрации, а яркость сравнима с величиной случайного шума, сопровождающего измерения. Такие задачи возникают в астронавигации при определении координат слабых звезд звездными датчиками для космических систем ориентирования, в радиолокации и гидролокации при определении точечных источников излучения, а также в мониторинге поверхности Земли и околоземного пространства космическими системами наблюдения для обнаружения движущихся объектов. Задача поиска подвижных объектов в последовательности изображений осложняется зависимостью формы объектов от субпиксельного положения объекта, а малое отношение сигнал/шум (с/ш) может потребовать совместной обработки нескольких кадров последовательности изображений с целью достижения приемлемой вероятности обнаружения. Последовательностью изображений будем называть временной ряд пространственно подобных изображений одной и той же сцены, имеющей отличия, обусловленные физическими причинами. Следствием таких причин являются изменения в положении и геометрии областей, изменение яркостных и статистических характеристик. Поэтому поставленные и исследуемые в данной работе задачи, связанные с повышением вероятности обнаружения движущихся точечных объектов в последовательности изображений, являются актуальными и практически значимыми.

Работа выполнена в лаборатории цифровых методов обработки изображений Института автоматики и электрометрии СО РАН в соответствии с планами НИР на 2004–2009 гг. по темам: «Математические методы, модели и программно–алгоритмические средства для создания интеллектуальных систем восприятия и анализа сигналов и изображений, управления и принятия решений» № гос. регистрации 0120.0 405433; «Развитие принципов построения и математическое моделирование интегрированных программно–аппаратных комплексов мониторинга окружающей среды, управление динамическими системами и принятия решений» № гос. регистрации 01.2.007 04687.

Целью работы является исследование и разработка алгоритмов обнаружения движущихся точечных объектов в последовательности изображений, полученных матричным фотоприемным устройством (ФПУ), и их реализация в виде программно–моделирующего комплекса.

Задачи исследования:

- разработать способ оценивания субпиксельных координат объекта с малой амплитудой на сильно зашумленных изображениях;

- разработать алгоритм адаптивной фильтрации, в котором для повышения отношения с/ш фильтр подстраивается под каждое положение объекта;
- исследовать возможности применения адаптивного фильтра в задачах обнаружения движущихся точечных объектов на изображениях;
- разработать алгоритм совместной обработки последовательности изображений для увеличения вероятности обнаружения объектов и исследовать его эффективность;
- реализовать предложенные алгоритмы в виде программно-моделирующего комплекса.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- предложен способ оценивания субпиксельных координат объектов, при котором смещения и среднеквадратичные отклонения оценок даже для малого отношения с/ш незначительны (составляют доли размера элемента ФПУ);
- разработан алгоритм адаптивной фильтрации, который дает существенное увеличение (в среднем до 23%) отношения с/ш выходного изображения;
- предложен алгоритм четырехканальной фильтрации, который при незначительном ухудшении качества адаптивной фильтрации (снижение отношения с/ш не более чем на 5%) существенно снижает вычислительные затраты (в 50–60 раз);
- разработан основанный на четырехканальной фильтрации алгоритм совместной обработки последовательности изображений, который обеспечивает двукратное уменьшение вероятности пропуска по сравнению с пространственно-инвариантной фильтрацией.

Практическая ценность работы заключается в возможности:

- проводить обнаружение точечного объекта в изображениях с мощной шумовой составляющей;
- находить субпиксельные координаты точечного объекта в изображениях последовательности;
- обнаруживать слабоконтрастные объекты за счет совместной обработки изображений последовательности;
- использовать созданные программные библиотеки и модули при проектировании и создании средств обнаружения и сопровождения точечных объектов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм адаптивной фильтрации с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов, основанный на методе максимального правдоподобия, позволяет существенно увеличить отношение с/ш выходного изображения, что дает возможность обнаруживать объекты с малой амплитудой на сильно зашумленных изображениях.

2. Четырехканальная фильтрация при значительном снижении вычислительных затрат обеспечивает практически такое же увеличение отношения с/ш выходного изображения как и адаптивная фильтрация. Экспериментально установлено, что в задаче обнаружения объектов по одному изображению применение четырехканальной фильтрации позволяет с большей вероятностью обнаруживать объект, чем при пространственно-инвариантной фильтрации.

3. Увеличение вероятности обнаружения достигается за счет совместной обработки двух или более изображений последовательности, где для фильтрации каждого из них подбирается соответствующий фильтр из набора четырех фильтров в зависимости от субпиксельных координат объекта.

4. Совместная обработка последовательности изображений с четырехканальной фильтрацией обеспечивает двукратное уменьшение вероятности пропуска по сравнению с пространственно-инвариантной фильтрацией, при этом отношение с/ш при четырех совместно обрабатываемых изображениях увеличивается почти в два раза.

Личный вклад автора. Основные теоретические и практические результаты получены автором лично. В. С. Киричуку принадлежит первичная постановка задачи обнаружения объекта. В соавторстве с В. С. Киричуком, В. П. Косых предложен алгоритм адаптивной фильтрации, который позволяет существенно повысить отношение с/ш выходного изображения. При разработке алгоритмов обнаружения были использованы достижения и опыт специалистов лаборатории цифровых методов обработки изображений ИАиЭ СО РАН. Из печатных работ, опубликованных диссертантом в соавторстве, в диссертацию вошли только те результаты, в получении которых он принял непосредственное участие на всех этапах: от постановки задач и теоретического анализа алгоритмов до написания программ и проведения численных экспериментов.

Реализация работы. Результаты работы реализованы в многофункциональном программном исследовательском комплексе, применяющемся в ФГУП ЦНИИ «Комета» и Институте автоматики и электрометрии СО РАН.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты докладывались и получили одобрение на семинарах лаборатории и института, Региональной конференции-конкурсе «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (Новосибирск, НГУ, 2006 г.), Международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Астана, ЕНУ им. Гумилева, 2006 г.), Научно-практической конференции молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно-вычислительные системы анализа и синтеза изображений» (Новосибирск, ИАиЭ СО РАН, 2006 г.), VII всероссийской конференции молодых ученых «Математическое моделирование и информационные технологии» (Красноярск, ИВМ СО РАН, 2006 г.), VIII всероссийской конференции молодых ученых «Математическое моделирование и

информационные технологии» (Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2007 г.), III научно–практической конференции «Виртуальные и интеллектуальные системы» (Барнаул, АГТУ, 2008 г.).

Публикации. Результаты диссертации достаточно подробно и в полном объеме отражены в 6 опубликованных печатных работах, в числе которых 3 статьи в российском рецензируемом научном журнале, а также 3 работы в материалах российских и международных научно–технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 110 страниц, включает 44 рисунка, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведена математическая модель, используемая для описания процесса регистрации изображений точечных объектов матричным ФПУ. Изображение точечного объекта в плоскости матрицы ФПУ полностью определяется функцией рассеяния точки (ФРТ) оптической системы, размерами и взаимными положениями элементов ФПУ. Регистрируемый элементом ФПУ сигнал можно представить в виде:

$$D_{ij} = A \int_{j-\frac{\Delta y}{2}}^{j+\frac{\Delta y}{2}} \int_{i-\frac{\Delta x}{2}}^{i+\frac{\Delta x}{2}} f(x-x_0, y-y_0) dx dy + b + \xi_{ij}, \quad (1.1)$$

где A – амплитуда сигнала от объекта; $f(x, y)$ – ФРТ оптического тракта; b – постоянный фон; i, j – координаты центра элемента ФПУ, имеющего размеры $\Delta x, \Delta y$ ($\Delta x, \Delta y \leq 1$); x_0, y_0 – координаты центра изображения объекта; ξ_{ij} – шум с нулевым средним значением, обусловленный ошибками измерений и случайной составляющей фона. Здесь и далее предполагается, что неравномерность чувствительности и различия в темновых токах элементов матрицы ФПУ исключены посредством предварительной калибровки.

Вид сигнала на выходе ФПУ существенно зависит от субпиксельного положения объекта. На рис. 1.1 показано изменение амплитуды сигнала на выходе ФПУ, когда ФРТ задается гауссоидой $\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}}$ ($r=0.4, A=100$), в зависимости от положения центра объекта относительно центра элемента матрицы. По вертикальной оси отложены значения сигнала в соответствующих элементах рассматриваемого поля. При совпадении центров объекта и элемента матрицы основная часть энергии объекта попадает в центральный элемент

рассматриваемого поля, когда же центр объекта расположен в углу элемента, его энергия практически равномерно распределяется по соседним ячейкам.

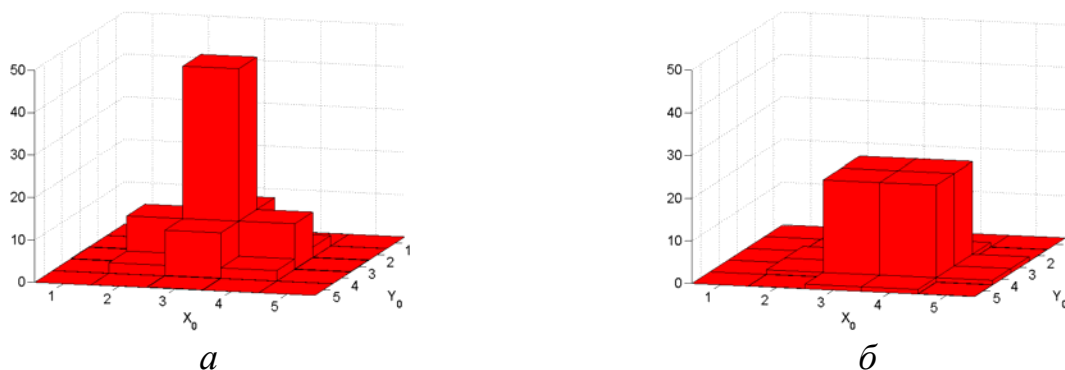


Рис. 1.1. Значения сигнала ФПУ от точечного объекта (*a* – центр объекта расположен в центре, *b* – в углу элемента ФПУ)

На рис. 1.2 показана зависимость амплитуды сигнала от положения центра объекта. При $r=0.4$ смещение координат центра изображения объекта от центра элемента к его углу приводит к падению отношения с/ш более чем в 2.5 раза.

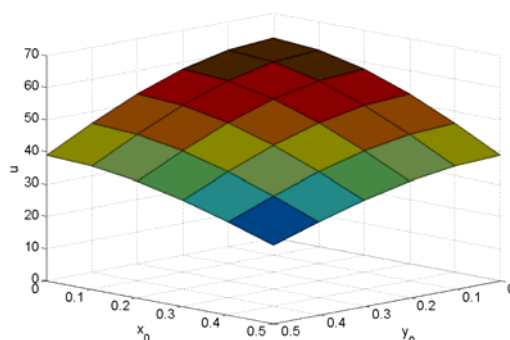


Рис. 1.2. Амплитуда сигнала ФПУ от точечного объекта при изменении положения объекта ($r = 0.4$)

С увеличением размера объекта изменение отношения с/ш уменьшается, но остается значительным, пока размер объекта сравним с размером элемента ФПУ.

В этой главе также дан обзор существующих методов обнаружения объектов в последовательности изображений.

Во второй главе излагается алгоритм адаптивной фильтрации с субпиксельным оцениванием координат точечного объекта, основанный на методе максимального правдоподобия, существенно увеличивающий отношение с/ш входного изображения. Повышение отношения с/ш входного изображения способствует надежности обнаружения объекта с малой амплитудой сигнала на сильно зашумленных изображениях.

Для последующего использования выражения (1.1) необходимо знание аналитического описания ФРТ. В реальных оптических системах ФРТ

отличаются друг от друга и, как правило, определяются в результате тестовых испытаний. В силу того что ФРТ обычно является гладкой функцией, на достаточно компактном множестве точек (рассматривалось множество точек размером $N = 5 \times 5$) ее можно с высокой точностью представить двумерным полиномом. Получив значения функции $f(x, y)$ на дискретном множестве точек (либо исходя из аналитического описания, либо в результате тестирования оптического тракта), представим ее в виде полиномиального разложения

$$f_{ij} = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^m a_{kl} P_k(x_i) P_l(y_j), \quad (2.1)$$

где a_{kl} – коэффициенты разложения; $P_k(x_i)$, $P_l(y_j)$ – полиномы k, l -й степени по соответствующим координатам. В векторно–матричном представлении разложение (2.1) имеет вид

$$\mathbf{f} = \mathbf{P}\mathbf{a}.$$

Здесь \mathbf{f} – вектор, составленный из элементов f_{ij} ; \mathbf{a} – вектор коэффициентов полинома; \mathbf{P} – матрица из полиномов $P_k(x_i)$, $P_l(y_j)$, при этом число отсчетов функции f_{ij} должны быть, по крайней мере, не меньше числа коэффициентов a_{kl} . Отметим, что оценка коэффициентов полинома, то есть вектора $\hat{\mathbf{a}}$, получаемая методом наименьших квадратов, является предварительной процедурой для данного оптического тракта и выполняется однократно. Выполнив лексикографическое упорядочивание отсчетов D_{ij} в (1.1) в области изменения i и j , математическую модель сигнала можно представить в векторно–матричном виде:

$$\mathbf{d} = A\mathbf{P}(x_0, y_0)\hat{\mathbf{a}} + b\mathbf{e} + \Xi, \quad (2.2)$$

где \mathbf{d} – вектор измерений D_{ij} ; вектор $\mathbf{e} = \left(\underbrace{1, \dots, 1}_N \right)^T$; Ξ – вектор случайного шума.

При такой математической модели сигнала необходимо проверить гипотезу о наличии объекта на изображениях, для чего следует оценить такие параметры, как амплитуда сигнала, уровень фона и субпиксельные координаты объекта. Задача является нелинейной, так как в модели (2.2) видно, что амплитуда сигнала и значение фона связаны с измерениями линейным образом, а субпиксельные координаты объекта – нелинейно. Поскольку форма сигнала от точечного объекта на выходе ФПУ значительно изменяется в зависимости от положения центра объекта относительно центра элемента ФПУ, нужно оценить субпиксельные координаты центра объекта. Найденные оценки позволят искомым адаптивный фильтр настраивать на каждое положение объекта. Для оценивания неизвестных параметров сигнала используется метод максимального правдоподобия, который в предположении о нормальности и некоррелированности шума приводит к минимизации следующего функционала

$$J = (\mathbf{d} - b\mathbf{e} - A\mathbf{P}(x_0, y_0)\hat{\mathbf{a}})^T (\mathbf{d} - b\mathbf{e} - A\mathbf{P}(x_0, y_0)\hat{\mathbf{a}}) \quad (2.3)$$

по четырем параметрам b, A, x_0, y_0 . Оценки параметров b и A получаются очевидным способом. Исключив эти параметры из функционала J можно

оценить параметры x_0, y_0 . Поскольку функционал J зависит от параметров x_0, y_0 нелинейно и для их оценок не существует простых аналитических выражений, его минимизация осуществляется итерационным способом. Качество оценок \hat{x}_0, \hat{y}_0 субпиксельных координат объекта дается их ковариационной матрицей. Полученный в результате оценивания неизвестных параметров вектор $\mathbf{P}(\hat{x}_0, \hat{y}_0)\hat{\mathbf{a}}$ является искомым адаптивным фильтром, подстраиваемым под каждое положение объекта. Нормированная оценка амплитуды $Q = \hat{A} / \sigma_A = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{P}(\hat{x}_0, \hat{y}_0)\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{e}^T \mathbf{d} \mathbf{e}^T \mathbf{P}(\hat{x}_0, \hat{y}_0)\hat{\mathbf{a}} / N}{\sqrt{\hat{\mathbf{a}}^T \mathbf{P}^T(\hat{x}_0, \hat{y}_0)\mathbf{P}(\hat{x}_0, \hat{y}_0)\hat{\mathbf{a}} - [\mathbf{e}^T \mathbf{P}(\hat{x}_0, \hat{y}_0)\hat{\mathbf{a}}]^2 / N}}$ является откликом фильтра.

Экспериментальные результаты. Исходная ФРТ задавалась в виде гауссоиды

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}} \quad (r=0.4, 0.5, 0.6, 0.7), \quad A=100.$$

Для аппроксимации ФРТ в окне $(|x| \leq 3r, |y| \leq 3r)$ использовался двумерный четный полином десятой степени.

Сигнал формировался в окне 5×5 элементов ФПУ и сопровождался аддитивным некоррелированным нормальным шумом с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением (СКО) s , изменявшимся от 0 до $0.2A$. Ввиду четности ФРТ положение центра объекта относительно центра элемента ФПУ изменялось только в диапазоне 0–0.5 с шагом 0.1 по каждой координате (всего 36 положений). Для каждого размера ФРТ и для каждого положения объекта осуществлялось по 1000 экспериментов, отличающихся реализациями шума.

Смещения $|x_0 - \hat{x}_0|, |y_0 - \hat{y}_0|$ оценок субпиксельных координат центра объекта при изменении как уровня шума, так и размера объекта незначимы. Максимальное смещение оценок при нулевом шуме ($s=0$) для всех размеров объекта не превосходит 0.008 элемента, а при отношении с/ш равном 10, достигает 0.14 при $r=0.7$ и не превосходит 0.07 при $r=0.4$.

На рис. 2.1 показаны значения смещений оценок, усредненные по всем рассмотренным положениям объекта, при различных размерах объекта и уровнях шума.

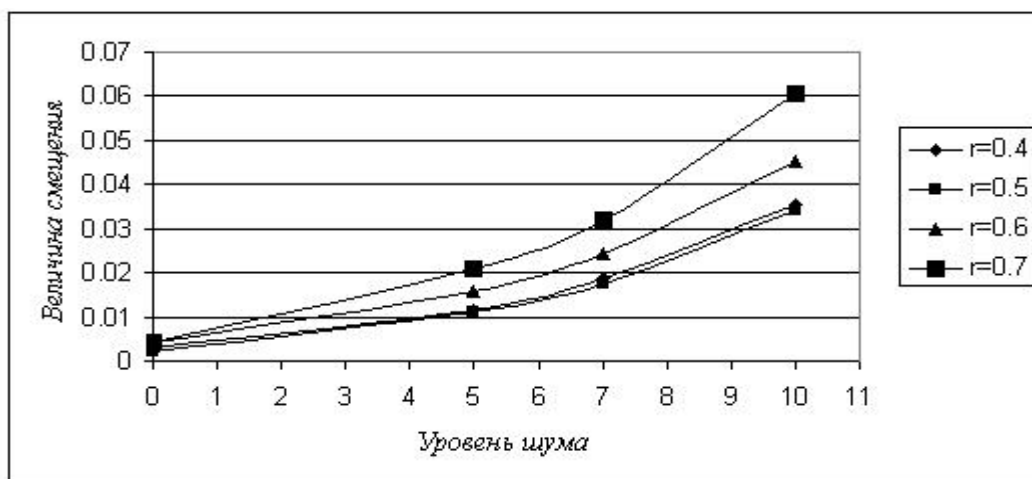
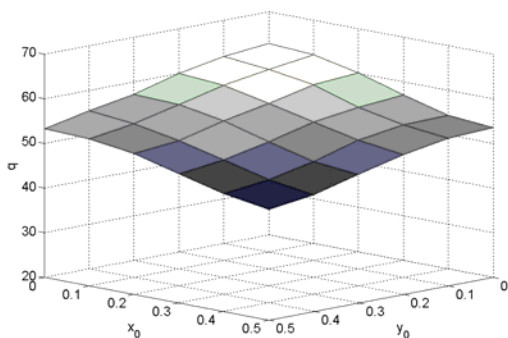


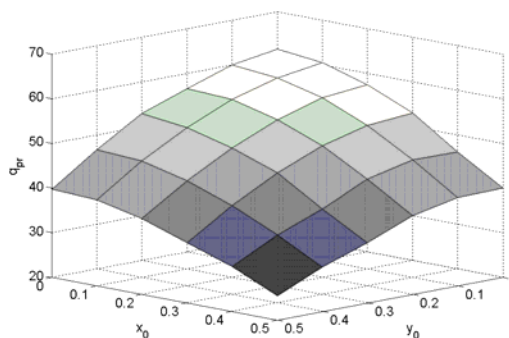
Рис. 2.1. Значения смещений оценок субпиксельных координат, усредненные по всем рассмотренным положениям объекта

Видно, что даже при большом уровне шума значение смещений оценок не превосходит 0.06. Зависимости СКО оценок координат от положения объекта также изменяются достаточно слабо и составляют доли элемента ФПУ.

Для оценивания качества адаптивной фильтрации эксперименты ставились с двумя фильтрами: с адаптивным и пространственно-инвариантным фильтром. Результаты адаптивной и пространственно-инвариантной фильтрации при $r = 0.4$ и $s = 10$ в зависимости от положения объектов иллюстрируют рис. 2.2, а и рис. 2.2, б соответственно.



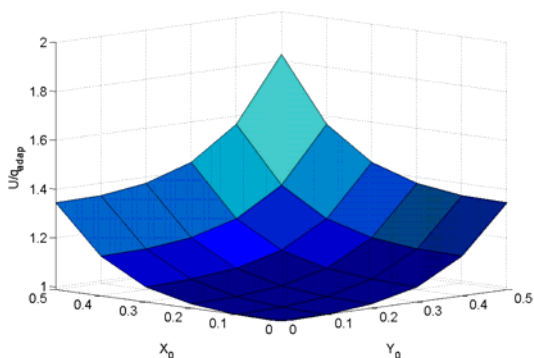
а



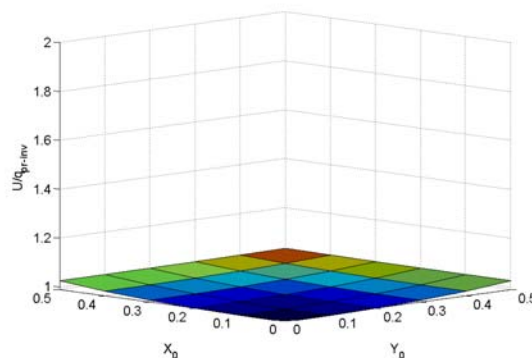
б

Рис. 2.2. Зависимость откликов адаптивного (а) и пространственно-инвариантного (б) фильтров от положения центра объекта ($r = 0.4$)

На рис. 2.3, а и рис. 2.3, б для того же размера объекта и уровня шума приведены соответственно показатели качества адаптивного и пространственно-инвариантного фильтров, определяемые как отношение с/ш входного изображения (см. рис. 1.2) к отклику соответствующего фильтра. Видно, что использование пространственно-инвариантного фильтра, когда центр объекта расположен в угловой точке элемента ФПУ, увеличивает отношение с/ш входного изображения в 1.1 раза, а адаптивный фильтр в угловой точке элемента ФПУ более чем в 1.8 раза, на краях почти в 1.4 раза. При увеличении как размера изображения объекта, так и уровня шума качество адаптивной фильтрации существенно не изменяется.



а



б

Рис. 2.3. Качество адаптивного (а) и пространственно-инвариантного (б) фильтров в зависимости от положения центра объекта ($r = 0.4$)

В табл. 2.1 представлены значения отношения с/ш входного изображения к отклику фильтра, усредненные по всем рассматриваемым положениям объекта, для всех рассмотренных случаев. Видно, что применение адаптивного фильтра в среднем позволяет увеличить отношение с/ш на выходе фильтра до 23%.

Таблица 2.1. Значения отношения с/ш входного изображения к отклику адаптивного фильтра, усредненные по всем положениям объекта

$r \backslash s$	0	5	7	10
0.4	1.18807	1.19765	1.20546	1.22779
0.5	1.16167	1.17575	1.18762	1.21589
0.6	1.13841	1.15645	1.17344	1.21058
0.7	1.11975	1.14495	1.16857	1.21317

Экспериментально установлено, что адаптивная фильтрация дает существенное увеличение отношения с/ш, но требует значительных вычислительных затрат, поскольку настройка фильтра на каждое субпиксельное положение объекта осуществляется итерационным способом.

В третьей главе предлагается алгоритм четырехканальной фильтрации, где вместо итерационной подстройки фильтра под каждое положение объекта используется набор фильтров. Фильтры настраиваются на четыре положения объекта: в центре элемента ФПУ ($x_0^{(1)} = 0, y_0^{(1)} = 0$), на краях ($x_0^{(2)} = 0, y_0^{(2)} = 0.5$), ($x_0^{(3)} = 0.5, y_0^{(3)} = 0$) и в угловой точке ($x_0^{(4)} = 0.5, y_0^{(4)} = 0.5$). Изображение точечного объекта фильтруется четырьмя фильтрами и в итоге получается четыре отклика $Q^{(1)}, Q^{(2)}, Q^{(3)}, Q^{(4)}$. Результирующее изображение после фильтрации составляется путем выбора максимума соответствующих элементов каждого из четырех откликов, т. е. $Q_{\max} = \max(Q^{(1)}, Q^{(2)}, Q^{(3)}, Q^{(4)})$. Причем для каждого элемента рассматриваемого изображения отдельно проводится данная процедура четырехканальной фильтрации. По сравнению с адаптивной фильтрацией такая процедура, во-первых, требует меньшего количества вычислительных операций, а, во-вторых, может быть легко выполнена в целочисленной арифметике, что немаловажно при ее аппаратной реализации.

На рис. 3.1 приведено поведение отклика Q_{\max} четырехканального фильтра для изображения объекта с $r=0.4$ и $s=10$. Четырехканальный фильтр дает практически такой же результат, что и адаптивный фильтр (см. рис. 2.2, а).

Качество четырехканальной фильтрации по сравнению с адаптивной фильтрацией иллюстрирует рис. 3.2, где приведено отношение откликов адаптивного и четырехканального фильтров, для случая, когда $r = 0.4$ и $s=10$. Из рис. 3.2 следует, что при совпадении положения объекта с положением фильтров $Q^{(1)}, Q^{(2)}, Q^{(3)}, Q^{(4)}$ качество четырехканального и адаптивного фильтров дает одинаковое увеличение отношения с/ш, а в других положениях объекта качество четырехканальной фильтрации незначительно ухудшается (не более чем на 5%).

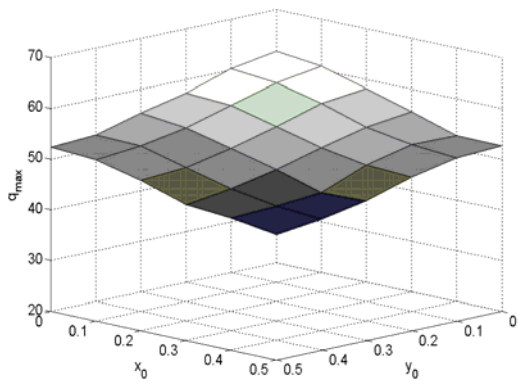


Рис. 3.1. Зависимость отклика четырехканального фильтра от положения центра объекта ($r = 0.4$)

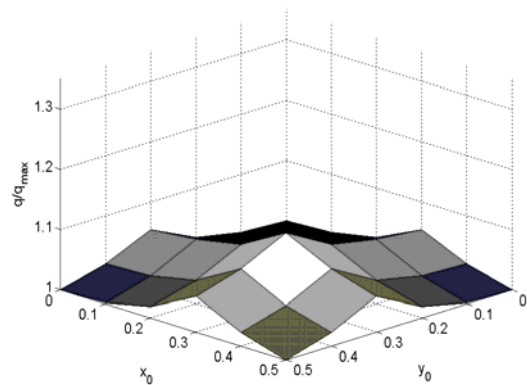


Рис. 3.2. Качество четырехканального фильтра в зависимости от положения центра объекта ($r = 0.4$)

Дальнейшее уменьшение количества фильтров приводит к значительному ухудшению качества фильтрации. Например, когда фильтр настраивался только на центр ($x_0^{(1)} = 0, y_0^{(1)} = 0$) и в угловую точку ($x_0^{(2)} = 0.5, y_0^{(2)} = 0.5$) элемента ФПУ, ухудшение качества адаптивной фильтрации составляло около 31%.

Обнаружительная способность четырехканального фильтра. Проводились исследования эффективности четырехканальной фильтрации в задаче обнаружения точечного объекта по одному изображению. Путем численного моделирования генерировался кадр изображения размера 1024×1024 элементов, содержащий 1600 объектов. Модели изображения объекта и случайного шума были аналогичны использованным в экспериментальной части второй главы. Объекты наносились в субпиксельных координатах от 0 до 0.5 с шагом 0.1 по каждой координате (всего 36 положений). Полученное анализируемое изображение подвергалось фильтрации поочередно каждым фильтром из набора четырех фильтров. После процедуры фильтрации строилось результирующее изображение, где его элементы заполнялись посредством выбора максимального из соответствующих элементов каждого из четырех откликов. Затем на полученном изображении максимальных откликов производился поиск локальных экстремумов (в окне 3×3 элементов ФПУ). Затем выполнялась пороговая обработка, где порог определялся по гистограмме распределения яркости локальных экстремумов на основании заранее задаваемой величины допустимой вероятности ложных тревог. В данном эксперименте величина уровня вероятности ложных тревог составляла 10^{-4} . Элементы отфильтрованного изображения, превышающие порог, считались подозрительными на наличие объекта.

В табл. 3.1 приведены усредненные оценки вероятности обнаружения при пространственно-инвариантной и четырехканальной фильтрации. Видно, что с уменьшением отношения с/ш вероятность обнаружения при четырехканальной фильтрации увеличивается по сравнению с пространственно-инвариантной фильтрацией. Следует отметить, что при положении центра объекта ближе к краям и угловой точке элемента ФПУ вероятность обнаружения при четырехканальной фильтрации существенно выше, чем при пространственно-

инвариантной фильтрации. Проведенные исследования показали целесообразность применения четырехканальной фильтрации в задаче обнаружения движущихся точечных объектов.

Таблица 3.1. Оценки вероятности обнаруженных объектов, усредненные по всем рассмотренным субпиксельным положениям объектов

Отношение с/ш	10	9	8	7	6	5	4
Пространственно-инвариантная фильтрация	0.99	0.99	0.99	0.96	0.91	0.74	0.45
Четырехканальная фильтрация	1	1	0.99	0.98	0.94	0.79	0.49

В четвертой главе с целью увеличения вероятности обнаружения предлагается совместно обрабатывать несколько изображений последовательности, а для подавления шума использовать четырехканальную фильтрацию.

При обнаружении точечных движущихся объектов целесообразно использовать для описания оптического изображения, проецируемого на плоскость матрицы ФПУ, следующую дискретную модель:

$$D_{ij}(t) = b + A(t)f(x_i - x_0(t), y_i - y_0(t)) + \xi_{ij}(t), \quad (4.1)$$

где i, j ($i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y$) – координаты узла дискретной решетки; $N_x \times N_y$ – размер матрицы; $t = 0 \dots T$ – номер момента времени регистрации; T – количество кадров последовательности; b – постоянный фон; A – амплитуда объекта; f – форма объекта в момент времени t , определяемая ФРТ оптической системы; $x_0(t) \leq 1, y_0(t) \leq 1$ – субпиксельные координаты в момент времени t ; $\xi_{ij}(t)$ – случайная величина, подчиняющаяся нормальному распределению $N(0, \sigma^2)$.

Предполагается, что объект в процессе наблюдения может двигаться с постоянной и известной скоростью. Тогда субпиксельные координаты центра объекта меняются во времени согласно выражениям:

$$x_0(t) = x_0 + v_x t; \quad y_0(t) = y_0 + v_y t, \quad (4.2)$$

где v_x, v_y – известные скорости объекта по соответствующим координатам.

Совместная обработка изображений последовательности с пространственно-инвариантной фильтрацией. Для обнаружения объекта с помощью двух или более изображений, например, $t = 1 \dots K$ с пространственно-инвариантной фильтрацией выполняются следующие шаги. Предполагается, что на опорном ($t=0$) изображении координаты центра объекта находятся в центре элемента ФПУ, т. е. в субпиксельных координатах $x_0 = 0, y_0 = 0$. С помощью выражений (4.2) вычисляется возможная траектория, т. е. рассчитываются координаты объекта для всех остальных кадров

последовательности t . Далее находятся целочисленные смещения объектов $\Delta x(t) = x_0(t)$, $\Delta y(t) = y_0(t)$ на каждом кадре. Затем, суммируем последовательность изображений t , смещая все K изображений на величины $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$ относительно опорного ($t=0$) изображения, т. е. получаем

$$\tilde{D}_{ij} = \sum_{t=0}^K D_{ij}(t). \quad (4.3)$$

Полученное суммарное изображение \tilde{D}_{ij} подвергается фильтрации пространственно-инвариантным фильтром $\mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))\hat{\mathbf{a}}$, настроенным на центр ($x_0 = 0, y_0 = 0$) элемента ФПУ. Отфильтрованное изображение подвергается пороговой обработке. Для обнаружения объекта в последующих кадрах последовательности проводятся операции, аналогичные описанным выше, каждый раз со смещением на один кадр вперед.

Совместная обработка изображений последовательности с четырехканальной фильтрацией. В отличие от предыдущего алгоритма здесь предполагается, что на опорном изображении ($t=0$) первоначально центр объекта может находиться в одном из четырех положений: в центре элемента ФПУ ($x_0^{(1)} = 0, y_0^{(1)} = 0$), на краях ($x_0^{(2)} = 0, y_0^{(2)} = 0.5$), ($x_0^{(3)} = 0.5, y_0^{(3)} = 0$) или в угловой точке ($x_0^{(4)} = 0.5, y_0^{(4)} = 0.5$). Также с учетом заранее известных параметров v_x, v_y объекта для каждого из четырех начальных положений рассчитываются четыре возможные траектории с помощью выражений (4.2) и вычисляются целочисленные и субпиксельные смещения объекта. Для каждого изображения из возможных четырех траекторий в зависимости от субпиксельных координат объекта подбирается один из четырех фильтров $\mathbf{P}(x_0^{(k)} + v_x t, y_0^{(k)} + v_y t)\hat{\mathbf{a}}$, где каждый фильтр настроен на первоначальные четыре положения объектов на опорном кадре ($t=0$). Аналогично вышеприведенным операциям, для каждой возможной траектории получаем суммарные изображения вида (4.3):

$$\tilde{D}_{ij}^{(k)} = \sum_{t=0}^K D_{i+\Delta x^{(k)}(t), j+\Delta y^{(k)}(t)}^{(k)}(t).$$

Здесь $\tilde{D}_{ij}^{(k)}(t)$ – изображение $D_{ij}(t)$, подвергнутое фильтрации фильтром $\mathbf{P}(x_0^{(k)} + v_x t, y_0^{(k)} + v_y t)\hat{\mathbf{a}}$. Далее из четырех суммарных изображений строится результирующее изображение \tilde{D}_{ij}^{\max} путем выбора максимального значения из соответствующего i, j – элемента каждого из четырех суммарных изображений, т.е. согласно выражению:

$$\tilde{D}_{ij}^{\max} = \max(\tilde{D}_{ij}^1, \tilde{D}_{ij}^2, \tilde{D}_{ij}^3, \tilde{D}_{ij}^4).$$

Затем изображение \tilde{D}_{ij}^{\max} подвергается пороговой обработке с целью обнаружения объектов, а полученные оценки вероятности обнаружения относятся к первому кадру последовательности. Для последующих кадров последовательности описанная процедура совместной обработки изображений с четырехканальной фильтрацией повторяется со смещением на один кадр.

Экспериментальные результаты. Исследования эффективности предложенных алгоритмов обнаружения движущихся точечных объектов проводились с исходными данными, представленными в главе 3. Объекты наносились на

изображения с учетом вектора скорости объекта, который был известным и постоянным. Отношение сигнал/шум на входе фильтра равнялось 3, то есть было достаточно малым. Проводилась совместная обработка четырех кадров последовательности изображений.

Для сравнения полученных результатов исследований был проведен эксперимент по определению предельной вероятности обнаружения, так называемого теоретического предела. Рассматривался идеальный случай, когда на всех изображениях последовательности центр объекта всегда находился в центре элемента ФПУ, чем обеспечивалась максимальная амплитуда из всех возможных, а фильтрация проводилась фильтром, согласованным с центральным положением объекта. Ниже показаны графики зависимости оценок вероятностей обнаружения от заданного уровня ложных тревог.

На рис. 4.1 приведен график, когда начальное положение объекта на первом кадре последовательности соответствовало угловой точке элемента ФПУ, а вектор скорости составлял $v_x = 1, v_y = 1$ (в этом случае объект на каждом кадре последовательности находится в угловой точке элемента ФПУ и имеет наименьшую амплитуду из всех возможных положений объекта).

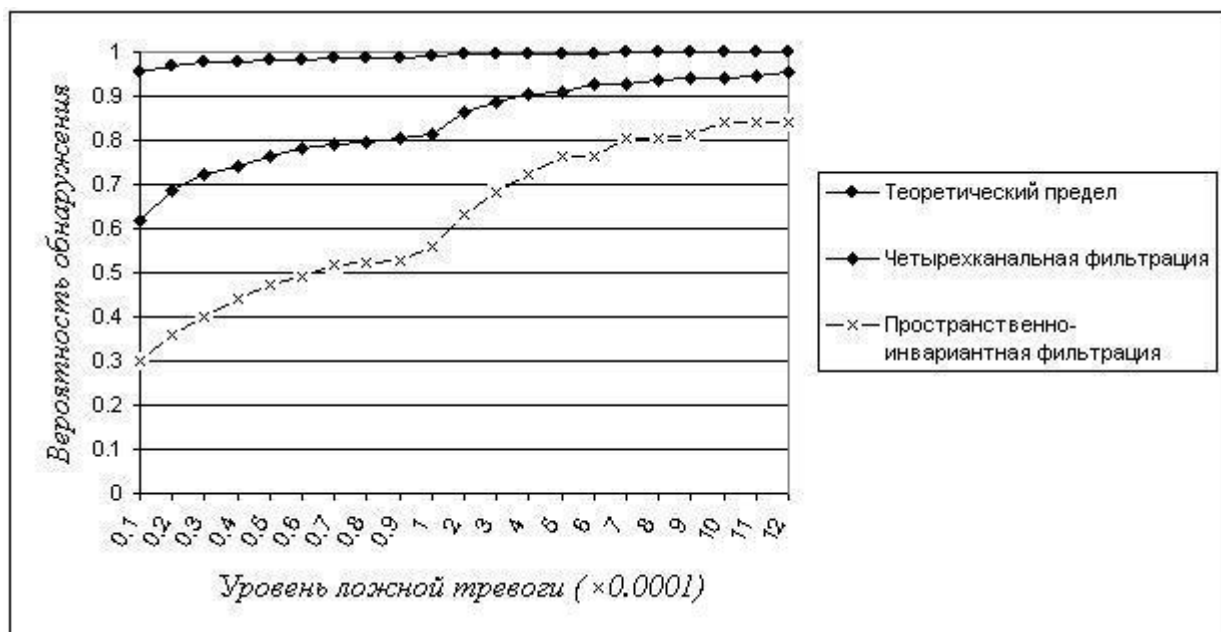


Рис. 4.1. Оценки вероятности обнаружения объектов

Видно, что оценки вероятности обнаружения для совместной обработки последовательности изображений с четырехканальной фильтрацией лежат в диапазоне 0,6–0,95, а для совместной обработки последовательности изображений с пространственно-инвариантной фильтрацией оценки лежат в диапазоне 0,3–0,85. Из этого следует, что при малых уровнях уровня ложных тревог четырехканальная фильтрация обеспечивает значимое увеличение вероятности обнаружения за счет увеличения отношения с/ш на выходе фильтра в 1,5–1,8 раза. Показано, что совместная обработка изображений с четырехканальной фильтрацией при любых заданных уровнях ложных тревог позволяет двукратно уменьшить вероятность пропусков.

Были проведены аналогичные эксперименты с учетом межэлементных промежутков, равных 20% от шага дискретизации. Установлено, что алгоритм совместной обработки последовательности изображений с четырехканальной фильтрацией позволяет с большей вероятностью обнаруживать объект.

На рис. 4.2 показаны оценки вероятности обнаружения для различных размеров объекта при отношении с/ш, равном 3. Здесь первоначально объект на первом кадре последовательности находился в центре элемента ФПУ, а вектор скорости имел составляющие $v_x = 0.5$, $v_y = 0.5$. Видно, что с увеличением размера объекта оценки вероятности обнаружения начинают падать. Это обуславливается тем, что при регистрации сигнала от точечного объекта с увеличением его размера амплитуда “падает”.

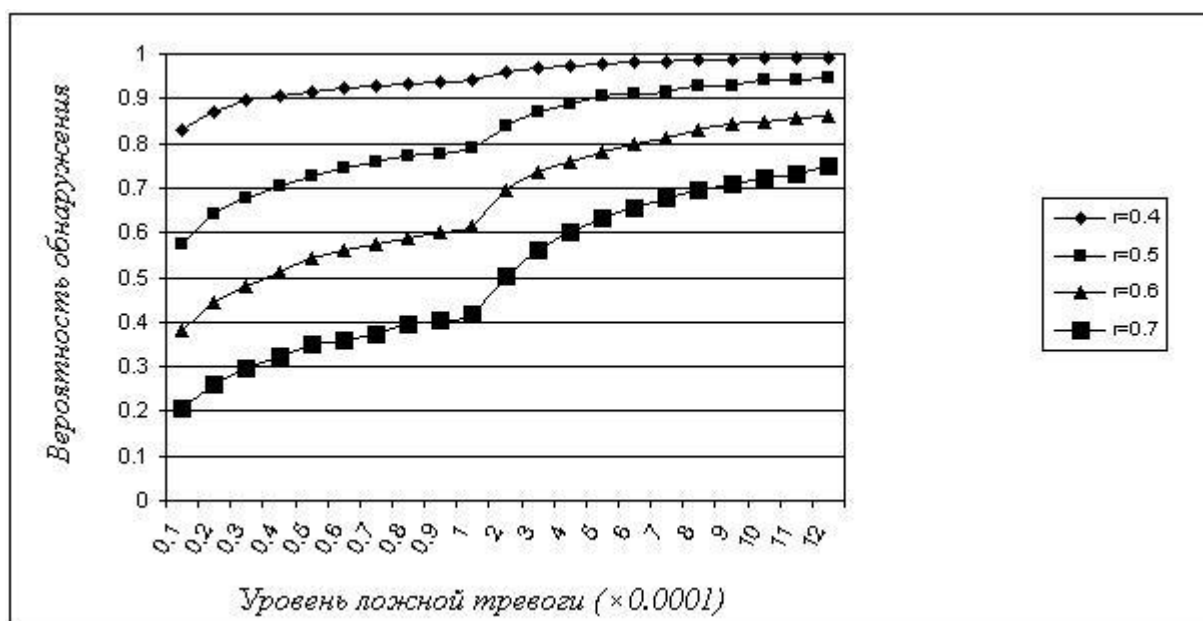


Рис. 4.2. Оценки вероятности обнаружения объектов

Дальнейший рост вероятности обнаружения объектов возможен при увеличении количества кадров, используемых при совместной обработке. На рис. 4.3 показаны оценки вероятностей обнаруженных объектов при совместной обработке последовательности изображений с четырехканальной фильтрацией, когда последовательность изображений сгенерирована так, что объект движется от центра элемента ФПУ со скоростью в 0.1 шага дискретизации за кадр в направлении края элемента ФПУ. Рассматривалось обнаружение объекта по одному, двум, трем и четырем изображениям. Величина уровня вероятности ложных тревог составляла 10^{-4} . Из рисунка видно, что с возрастанием количества изображений, используемых при совместной обработке, оценки вероятности обнаружения возрастают. Наблюдается симметричность оценок, когда субпиксельные координаты объекта находятся в следующем элементе ФПУ.

Очевидно, что при увеличении отношения с/ш входного изображения вероятность обнаружения объектов возрастет, так как уже совместная

обработка четырех кадров при отношении с/ш, равном 3, обеспечивает хороший результат.

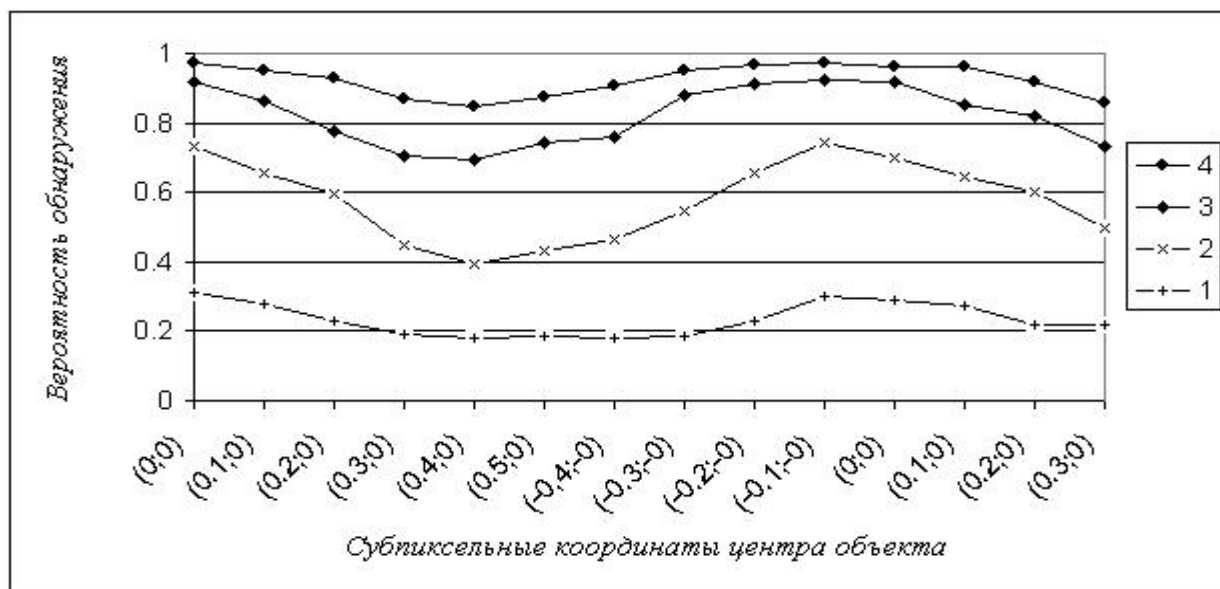


Рис. 4.3. Оценки вероятности обнаружения объектов

На рис. 4.4 приведены фрагменты (256×256) изображений при совместной обработке четырех изображений с четырехканальной фильтрацией, где входное отношение с/ш было равно 3.

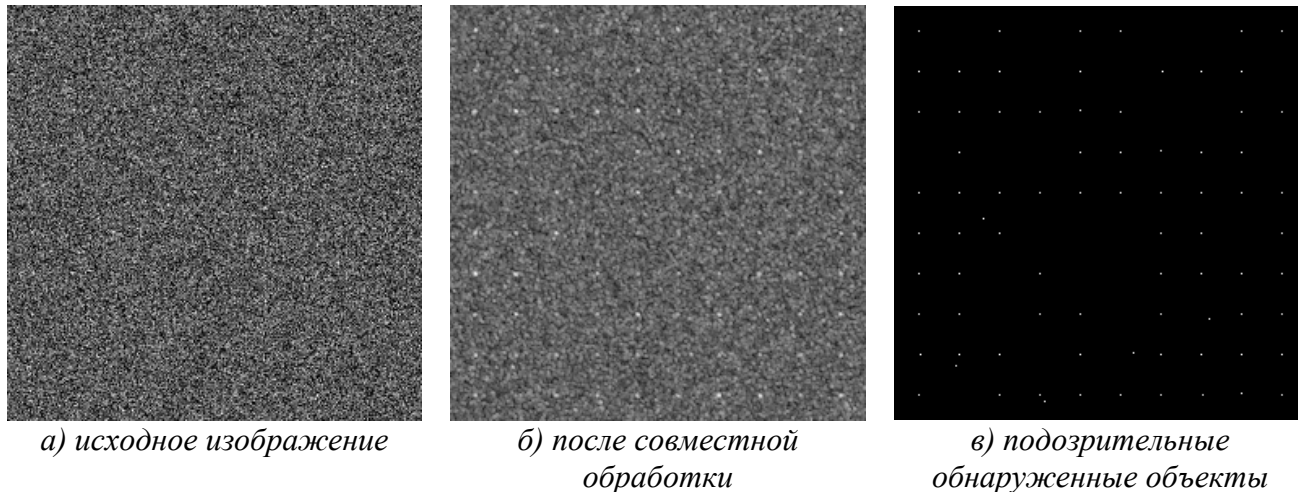


Рис. 4.4. Эффективность совместной обработки с четырехканальной фильтрацией

Все предложенные алгоритмы были реализованы в виде программно-моделирующего комплекса в среде разработки Microsoft Visual Studio 6.0 на языке C++.

В заключении перечислены основные результаты диссертации:

1. Разработан алгоритм адаптивной фильтрации с субпиксельным оцениванием координат объекта. Применение адаптивной фильтрации по сравнению с

пространственно–инвариантной фильтрацией позволяет существенно (до 23%) увеличить отношение сигнал/шум на выходе фильтра.

2. Численные эксперименты показали, что смещения оценок субпиксельных координат центра объекта даже для сравнительно малого отношения сигнал/шум незначимы (при отношении с/ш =6 смещения не превышают 0.07).

3. На основе алгоритма адаптивной фильтрации разработан алгоритм четырехканальной фильтрации, позволяющий существенно снизить вычислительные затраты (в 50–60 раз) при незначительном ухудшении качества фильтрации (не более чем на 5%).

4. Разработан алгоритм совместной обработки последовательности изображений с четырехканальной фильтрацией для случая с неизвестными первоначальными координатами объекта, но с известной скоростью.

5. Экспериментально установлено, что уже совместная обработка четырех кадров последовательности с четырехканальной фильтрацией по сравнению с пространственно–инвариантной фильтрацией обеспечивает значимое увеличение вероятности обнаружения, даже при малом входном отношении сигнал/шум ($s/n=3$), при этом вдвое уменьшает вероятность пропуска. Получены экспериментальные оценки зависимости вероятности обнаружения от различных уровней ложных тревог и отношений сигнал/шум.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Киричук В.С., Косых В.П., Курманбек уулу Т. Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // Автометрия. 2006. 42, № 1. С. 3–12.

2. Курманбек уулу Т. Модификация алгоритма адаптивной фильтрации изображений точечных объектов // Автометрия. 2007. 43, № 1. С. 44–48.

3. Киричук В.С., Косых В.П., Курманбек уулу Т. Алгоритмы обнаружения движущихся малоразмерных объектов по последовательности изображений // Автометрия. 2009. 45, № 1. С. 14–22.

4. Киричук В.С., Курманбек уулу Т. Обнаружение точечных объектов с помощью модифицированного алгоритма адаптивной фильтрации // Материалы V международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». Астана: ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2006. С. 266–270.

5. Киричук В.С., Курманбек уулу Т. Сравнительные характеристики обнаружительной способности алгоритмов четырехканальной и пространственно–инвариантной фильтрации // Материалы научно–практической конференции молодых ученых и студентов НГУ и ИАиЭ СО РАН «Информационно–вычислительные системы анализа и синтеза изображений». Новосибирск: НГУ, 2006. С. 12–15.

6. Киричук В.С., Косых В.П., Курманбек уулу Т. Совместная обработка последовательности изображений при поиске движущихся объектов с известным вектором скорости // III международная научно–практическая конференция «Виртуальные и интеллектуальные системы». Барнаул: АГТУ им. И.И. Ползунова, 2008. С.10–12.

Курманбек уулу Талантбек

Обнаружение и определение
координат движущихся точечных
объектов в последовательности изображений

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать «25» мая 2009 г.
Формат 60x84 1/16 Объем 1 п. л.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 45

Типография Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 5.