

ПРИМЕНЕНИЕ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СУБПОЛОСНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ. Методы обработки изображений для распознавания объектов

Попов А. Н.¹, аспирант, ✉ l.boris-bleb@yandex.ru, orcid.org/0009-0004-8322-8584

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, д. 85, 308015, Белгород, Россия

Аннотация

В статье проанализированы существующие методы обнаружения малоразмерных объектов по изображениям в каналах технического зрения на фоне шумов. Показано, что метод обнаружения изображений малоразмерных объектов, основанный на вычислении отношения правдоподобия с использованием оценки математического ожидания выборок пространственно-субполосных векторов и их ковариационных матриц, является перспективным для дальнейших исследований. Для решения задачи обнаружения малоразмерных объектов по изображениям каналов технического зрения, а также для подготовки данных для последующих этапов (распознавания и идентификации в качестве основного инструмента) предлагается метод субполосного анализа на основе применения новых базисных функций. Проведена экспериментальная оценка качества обнаружения малоразмерных объектов вышеописанным методом, из которой следует, что приемлемые показатели вероятности правильного обнаружения (0,95) при вероятности ложной тревоги 10^{-4} достигаются при отношении сигнал / шум более 14. Исходя из того, что шум на изображениях не всегда является статически независимым и аддитивным, оценка влияния пространственных спектральных характеристик шума подлежит дальнейшему исследованию. Проведён анализ влияния статистически независимого аддитивного шумового процесса на показатели качества обнаружения и распознавания. При этом использован набор исходных изображений, содержащих изображения малоразмерных объектов вида беспилотных летательных аппаратов. Для поиска объекта на анализируемом изображении использовалось его эталонное изображение. В ходе проведенного исследования установлено, что семейство зависимостей вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал / шум с учетом заданной вероятности ложной тревоги при воздействии аддитивного белого шума является классическим видом, характерным для алгоритмов обнаружения объектов. Выявлено необходимое отношение сигнал / шум, которое позволяет достигнуть приемлемой вероятности правильного обнаружения.

Ключевые слова: фото- и видеоизображение, методы распознавания изображений,

алгоритмы анализа изображений, улучшение качества изображений, техническое зрение, субполосные методы.

Цитирование: Попов А. Н. Применение базисных функций для повышения вероятности распознавания малоразмерных объектов с использованием методов субполосного анализа изображений. Методы обработки изображений для распознавания объектов // Компьютерные инструменты в образовании. 2025. № 1. С. 33–47. doi:10.32603/2071-2340-2025-1-33-47

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные вызовы, связанные с разработкой и совершенствованием технических средств, методов и алгоритмов для обработки изображений, актуальны как для гражданских, так и для оборонных задач. Основные задачи включают обработку визуальной информации и распознавание объектов, таких как люди, их лица, транспортные средства, воздушные и морские объекты, а также объекты в движении.

Эти задачи особенно важны в таких сферах, как оперативно-спасательные работы, поисковые операции, построение систем безопасности, идентификация транспортных средств и мониторинг сельскохозяйственных и лесных угодий с использованием геолокационных данных. Стоит отметить, что особое внимание отводится обнаружению и распознаванию малоразмерных объектов. Для этого необходимо решить ряд проблем, таких как улучшение качества изображения, устранение шумов, коррекция артефактов и создание предпосылок для успешного распознавания.

Термины «обнаружение», «распознавание» и «идентификация» объектов на изображениях имеют разное значение и нередко интерпретируются неоднозначно. В данном исследовании под обнаружением понимается не определение координат объекта, а факт его присутствия на изображении, например на фоне неба, земли или воды. Такое понимание термина согласуется с тем, что можно встретить в военных словарях. Этот этап является основополагающим для последующего распознавания и идентификации, понятия которых также подробно раскрыты в военно-энциклопедических источниках.

Таким образом, входными данными для системы обнаружения и распознавания объектов являются визуальные артефакты, выделяющиеся на фоне естественной среды. С точки зрения математики, результатом работы системы технического зрения является критерий (решающее правило), позволяющий с заданной вероятностью подтвердить наличие объекта на изображении.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет вероятности правильного обнаружения стандартными статистическими методами требует выполнения большого числа однотипных вычислительных экспериментов. Однако это может быть затруднительно из-за ресурсоемкости процесса. В таких случаях целесообразно использовать методы математического моделирования.

Одним из подходов является моделирование зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум. Для этого в контрольную выборку, полученную из исходного изображения, вводится искусственная шумовая компонента. Этот шум должен быть статистически независимым для каждого проводимого эксперимента, что позволяет достоверно оценить влияние шумов на вероятность обнаружения.

Задача состоит в выявлении количественного влияния шумов как на изображениях, содержащих малоразмерные объекты, так и на характеристики качества обнаружения этих объектов. Исходными данными в исследовании выступают набор изображений, отношение сигнал/шум, заданная вероятность ложной тревоги. Результатом исследования предстанет зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум при заданной вероятности ложной тревоги.

Приведенный в исследовании подход предполагает проведение гибкой настройки алгоритмов обнаружения с целью обеспечения баланса между высокой вероятностью обнаружения малоразмерных объектов и минимизацией ложных тревог, что является критичным для обработки изображений с высокой плотностью информации.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статье [25] представлено сравнение различных методов анализа изображений, включая субполосный анализ. Для реализации подхода авторы использовали распределение энергии компонент в двумерных подобластях, которые формируются на основе двумерного преобразования Фурье. Такой подход позволил выполнить сжатие изображений и оценить их узнаваемость.

Примером для анализа послужили черно-белые снимки земной поверхности, полученные из космоса. Авторы работы [25] показали, что степень сжатия до 500 раз сохраняет узнаваемость объектов на изображениях. Для сравнения был использован формат JPEG2000, базирующийся на алгоритмах вейвлет-анализа, при котором узнаваемость сохранялась при сжатии лишь до 250 раз.

Тем не менее субполосный анализ требует дальнейших исследований и совершенствования, особенно в следующих направлениях:

- создание новых базисных функций для более точного моделирования субполосного анализа;
- разработка усовершенствованных вычислительных алгоритмов;
- обеспечение адекватности и достоверности представления данных в частотно-временной интерпретации;
- разработка методов увеличения резкости изображений и подавления шумов для улучшения контрастности;
- оптимизация вычислительных процессов.

Субполосный анализ реализуется на основе следующего косинус-преобразования:

$$F^x(u) = \sum_{k=1}^K x_k \cos\left(u\left(k - \frac{1}{2}\right)\right), \quad u \in D_\pi, \quad (1)$$

$$D_\pi = \{u \vee 0 \leq u < \pi\}, \quad (2)$$

$$x_k = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi F^x(u) \cos\left(u\left(k - \frac{1}{2}\right)\right) du, \quad (3)$$

где $k = 1, 2, \dots, K$; u — круговая частота.

В работе [26] теоретически обоснованы и практически продемонстрированы преимущества этого метода на примере анализа морской поверхности.

Косинус-преобразование позволило исследовать распределение энергии компонент изображения в частотной области с учетом изменения волнения моря. Для каждой частотной области уточняется распределение энергии, что повышает точность анализа по сравнению с традиционным преобразованием Фурье.

В работе [27] описано использование квазисубполосных матриц косинус-преобразования для анализа и синтеза изображений при применении двумерного подхода. Кроме того, в исследованиях [28–30] учёные показали перспективы комбинации метода с другими аналитическими инструментами.

Для повышения эффективности методов обработки изображений, особенно в контексте малоразмерных объектов, важно развивать подходы, обеспечивающие высокую вероятность их обнаружения с учетом допустимого уровня ложных тревог.

Следует подчеркнуть, что при обнаружении малоразмерных объектов применялись параметрические решающие правила, базирующиеся на построении отношения правдоподобия с использованием критерия Неймана-Пирсона, который определяет порог обнаружения при заданной вероятности ложных тревог. При этом основным показателем качества алгоритма считается вероятность правильного обнаружения объекта.

Для построения решающего правила необходимо представить исходное видеоизображение в виде выборок многомерных пространственно-субполосных векторов [25], что сохраняет как пространственную, так и частотную структуру изображения [26]. Такой факт дает преимущество перед методами, которые используют правила распознавания с предварительным определением и использованием параметров информативности признаков распознавания.

Исходное видеоизображение можно представить в виде набора базисных функций, использующих пиксели с битовым представлением (например $P = 2c$, где c — биты) уровней яркости, где число бит определяется количеством градаций уровней яркости от черного до белого цвета [27].

Все строки изображения представляются в виде вектора [26]:

$$\vec{S} = (s_1, s_2, \dots, s_Q), \quad q = 1, \dots, Q, \quad (4)$$

где Q — количество пикселей в строке; q — номер пикселя; s — число уровней градации пикселя (яркость).

При этом изменение яркости пикселей в строке изображения соотносится с некоторыми «пространственными частотами». Далее рассчитывается субполосная матрица A_k для каждого частотного интервала k . Вектор (4) преобразовывается в вектор размерностью k вида [25, 26]:

$$\vec{U} = (U_{(1)}, U_{(2)}, \dots, U_{(k)})^T, \quad (5)$$

где U — доля (часть) энергии сигнала в частотном интервале; $k = 1, \dots, K$ — номер частотного интервала; T — знак транспонирования.

Вектор вида (5) можно назвать пространственно-субполосным вектором (ПСВ). Таким образом, полученные преобразования позволяют существенно повысить вероятность распознавания образов.

4. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Проведем анализ известных методов обработки и обнаружения малоразмерных объектов по видеоизображениям в различных каналах технического зрения с целью выбора наиболее приемлемого для рассматриваемых условий.

В работе [1] предложено подразделение задач обработки изображений на три основные категории: обработка, анализ и синтез. Однако границы между этими категориями зачастую оказываются расплывчатыми, поэтому для большей структурированности вводится дополнительная классификация:

1. *Процессы низкого уровня.* Подразумевают относительно простые методы повышения качества изображения, такие как снижение уровня шума или увеличение контрастности.
2. *Средний уровень.* Характеризуется извлечением информации, связанной с конкретными элементами изображения, например выделением объектов и их признаков.
3. *Высокий уровень.* Сюда включаются задачи интерпретации визуальных данных, которые предполагают применение технологий машинного зрения и методов распознавания объектов.

Выполнение всех предлагаемых условий приводит к существенному усложнению решаемой задачи. Поэтому для нашего случая не подходит.

Среди широко используемых методов повышения качества изображений особое место занимает комплекс поэлементных преобразований [2]. Такие преобразования позволяют улучшить визуальные характеристики изображения, что критически важно для корректного обнаружения и дальнейшего анализа объектов.

В рамках работы с изображениями основными подходами поэлементных преобразований являются:

1. *Линейное контрастирование* — метод преобразования диапазона яркости изображения, позволяющий расширить его до максимально доступного. Это улучшает детализацию и восприятие изображения.
2. *Соляризация* — техника, при которой изменяется распределение яркости пикселей. Тёмные участки остаются неизменными, а яркие приобретают яркость, схожую с чёрными. Это помогает выделить ключевые элементы изображения.
3. *Препарирование* — метод акцентирования деталей изображения для улучшения его анализа.
4. *Эквализация* — перераспределение яркости изображения, направленное на выравнивание интенсивности пикселей и улучшение видимости объектов.

В основе линейного контрастирования лежит подход, основанный на трансформации исходного диапазона яркости пикселей (который часто является ограниченным) в полный возможный диапазон яркости. Контрастирование является одним из наиболее используемых приёмов работы с изображениями [3].

Недостатком подхода является то, что он не позволяет в достаточной мере производить процедуру обнаружения и распознавания малоразмерных объектов из-за ограниченного количества пикселей при обработке.

В основе соляризации используется преобразование, обеспечивающее неизменность яркости пикселей, имеющих чёрный цвет. При этом пиксели, имеющие цвет близкий к белому, получают такую же яркость, как у чёрных, то есть участки, близкие к серому цвету, становятся белыми. Описанный подход также не позволяет решать поставленную задачу на основе бинарного способа представления элементов изображения, что ограничивает динамический диапазон работы с изображениями.

Препарирование изображений относится к числу наиболее известных и давно применяемых методов обработки визуальных данных [4]. Этот метод включает разнообразные подходы поэлементных преобразований: линейное контрастирование в пределах заданного диапазона яркости, пилообразное контрастирование, при котором создаётся пери-

одическая зависимость яркости, локальное контрастирование, усиливающее различия в небольших областях изображения, и др.

Несмотря на универсальность и широкую применимость, данный подход имеет ограничения. Он, как и другие методы, базирующиеся на работе с динамическим диапазоном яркости, оказывается недостаточно эффективным для задач обнаружения малых объектов. Это связано с ограниченной возможностью обработки низкоразмерных деталей на изображениях.

Эквализация представляет собой подход, основанный на преобразовании гистограмм. Подробное описание преобразований серых и цветных изображений приведено, например, в работе [5]. На основе эмпирических данных в виде гистограмм распределения яркости пикселей изображения осуществляется переход к интегральному закону распределения вероятности, который соответствует исходному изображению. Выходное изображение имеет уже равномерное распределение яркости. Необходимо отметить, что эффективность преобразования может быть увеличена при обработке отдельных участков изображения. Предложенный подход требует сравнительно больших вычислительных мощностей и имеет ограничения, обусловленные тем, что выходное изображение имеет равномерное распределение яркости.

Одним из ключевых методов улучшения качества изображений является совмещение реальных данных с виртуальными контурами [6, 7]. Этот подход включает использование изображений, созданных на основе различных физических принципов, что делает его особенно актуальным для бортовых систем технического зрения летательных аппаратов. В то же время он находит применение в таких областях, как спутниковая съёмка, сельское хозяйство, медицина и зоология [8–16].

Однако метод совмещения изображений, даже при успешном применении афинных преобразований, без принципа комплексирования изображений не всегда может привести к улучшенному качеству изображения и, как следствие, эффективному обнаружению и распознаванию малоразмерных объектов.

В настоящее время начал широко применяться вейвлет-анализ [17–19]. Его способность выполнять спектральные операции сделала его незаменимым инструментом для работы с изображениями. Он применяется для анализа, обработки, цифровой фильтрации изображений и распознавания образов в видеопотоках данных.

Вейвлет-анализ и соответствующие алгоритмы считаются одними из наиболее точных инструментов для обработки сигналов и распознавания образов. Однако в отношении его применения к задачам распознавания и сжатия изображений существуют множество ограничений вычислительного порядка. Проведенные исследования [20–24] предлагают альтернативные подходы, которые в настоящее время не доведены до практической реализации. Это указывает на необходимость дальнейшего изучения и доработки методов.

Исходя из этого для решения задачи обнаружения малоразмерных объектов по изображениям каналов технического зрения, а также для подготовки данных для последующих этапов (распознавания и идентификации в качестве основного инструмента) предлагается метод субполосного анализа на основе применения новых базисных функций.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве метода обнаружения малоразмерных изображений используем алгоритм, предложенный в работе [31].

В данном алгоритме формируется обучающая выборка по изображениям объектов, поиск которых будет выполняться впоследствии на исследуемых изображениях (рис. 1). На таком изображении выделяется «окно», соизмеримое с размерами ожидаемого объекта. Осуществляется «скольжение» окна по изображению. При этом на каждом шаге скольжения вычисляется логарифм отношения правдоподобия и сравнивается с заданным порогом. Превышение порога означает «обнаружение» объекта поиска.



Рис. 1. Эталонное и исследуемое изображения [31]

Исследуемые изображения должны быть предварительно размечены так, чтобы можно было определить как ошибки первого рода, так и ошибки второго рода. Решающее правило (6):

$$L = \frac{n}{2} \ln \frac{|M_{(k \times k)}^{(1)}|}{|M_{(k \times k)}^{(0)}|} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\vec{U}_{(k)i} - \vec{m}_{(k)}^{(1)} \right)^T \cdot \left(M_{(k \times k)}^{(1)} \right)^{-1} \cdot \left(\vec{U}_{(k)i} - \vec{m}_{(k)}^{(1)} \right) - \left(\vec{U}_{(k)i} - \vec{m}_{(k)}^{(0)} \right) \cdot \left(M_{(k \times k)}^{(0)} \right)^T \cdot \left(\vec{U}_{(k)i} - \vec{m}_{(k)}^{(0)} \right) > \ln C, \quad (6)$$

где m — вектор математического ожидания распределения случайной величины ПСВ; M — ковариационная матрица; $U_{(k)i}$ — выборка пространственно-субполосного вектора размерностью k на i пикселей; C — величина порога обнаружения.

При оценках m и M верхние индексы обозначают гипотезу (1 соответствует гипотезе H_1 , 0 — гипотезе H_0), нижние индексы обозначают размерность. В выражении (6) $M_{(k \times k)}^{(1)}$ и $\vec{m}_{(k)}^{(1)}$ — это оценки, полученные в процессе обучения, а $M_{(k \times k)}^{(0)}$ и $\vec{m}_{(k)}^{(0)}$ — оценки, получаемые по контрольной выборке.

Отметим, что контрольная выборка представляет собой текущее оценивание параметров исследуемого изображения. Используя критерий вероятности ошибки первого рода α (ложная тревога), получаем возможность определения порога принятия решения, где при меньшем значении α вырастает величина порога. Представим выражение для оценки вектора математического ожидания:

$$\vec{m}_{(k)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{U}_{(k)i}. \quad (7)$$

Размерность вектора \vec{m} равна K .

Тогда оценка ковариационной матрицы вычисляется следующим образом:

$$M_{(k \times k)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\vec{U}_{(k)i} - \vec{m}_{(k)}) (\vec{U}_{(k)i} - \vec{m}_{(k)})^T. \quad (8)$$

Более подробное описание представленного математического аппарата дано в работах [32–34]. Проанализированное в исследовании решающее правило позволяет распознавать конкретный объект, по которому было проведено обучение.

Для проведения эксперимента использовались контрольные выборки исходного изображения на фоне случайного шума при разных отношениях сигнал/шум. Для этого контрольная выборка исходного изображения $S = (i, q)$, где $i = 1, 2, \dots, M$ (количество строк), $q = 1, 2, \dots, Q$ (количество столбцов), зашумлялась на основании следующего выражения:

$$S_{iq} = S_{iq} + \hat{\eta}_{iq}, \quad (9)$$

где S_{iq} — контрольная выборка исходного сигнала с шумом; S_{iq} — текущее значение сигнала; $\hat{\eta}_{iq}$ — контрольная выборка шума.

При этом

$$\hat{\eta}_{iq} = d \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [S_{iq}]^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [\eta_{iq}]^2}} |\eta_{iq}|, \quad (10)$$

где d — величина отношения сигнал/шум; η_{iq} — массив псевдослучайных значений типа «белый шум».

Следует упомянуть, что с использованием представленной методики проведены зашумления контрольных выборок, которые поступали на вход решающего правила. При этом вероятности ошибки первого рода для каждой группы экспериментов задавались формулой $\alpha = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$.

Представленная выборка количества испытаний определялась не менее 200 раз для каждого заданного значения сигнал/шум, что позволяет обеспечить доверительный интервал оценок не менее 0,98. В этом случае оценка вероятности правильного обнаружения \hat{D}_n может определяться по формуле

$$\hat{D}_n = \frac{n_{\text{П}}}{n_{\text{О}}}, \quad (11)$$

где $n_{\text{П}}$ — число испытаний, в которых было принято правильное решение; $n_{\text{О}}$ — общее число испытаний.

Приведенные на рис. 2 зависимости \hat{D}_n (вероятности правильного обнаружения) от отношения сигнал/шум позволяют провести анализ влияния величины отношения сигнал/шум на показатели качества решающего правила. Так, при увеличении отношения сигнал/шум возрастает вероятность оценки правильного обнаружения объекта. При этом допустимая величина вероятности правильного обнаружения порядка 0,95 достигается при величине отношения сигнал/шум порядка 14 при заданной вероятности ошибки первого рода 10^{-4} .

В работах [35–38] можно найти дополнительную информацию по тематике анализа фото- и видеоизображений.

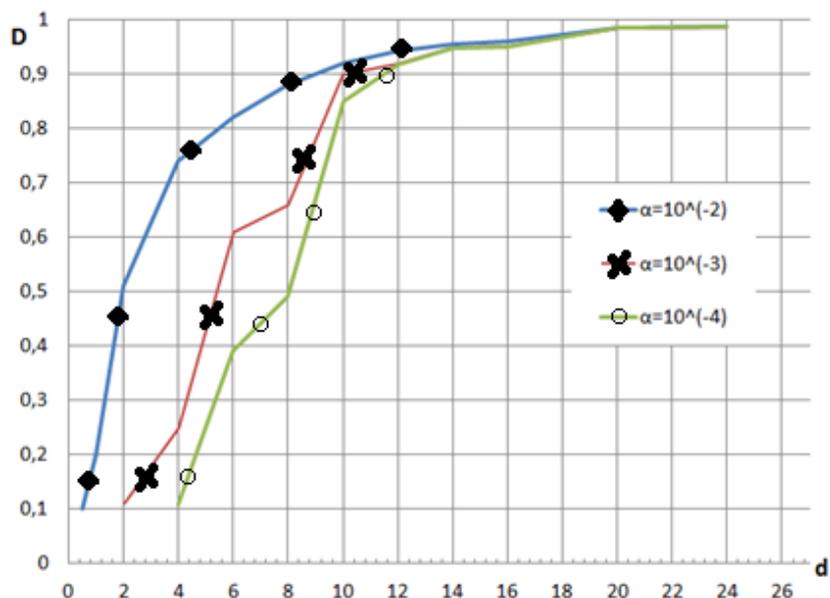


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от соотношения сигнал/ шум при заданных α

6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе проведен анализ современных методов обработки фото- и видеоизображений, акцентировано внимание на актуальности задач формирования, передачи и обработки изображений. Рассмотрены различные подходы с точки зрения их эффективности для распознавания объектов на изображениях.

Выявлена высокая перспективность методов, основанных на субполосном анализе и распознавании видеоинформации, особенно для задач, связанных с обработкой малоразмерных объектов. Однако показано, что на фоне шумов различной природы вероятность успешного распознавания таких объектов остается недостаточной.

В ходе исследования изображений установлена экспериментальная зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум согласно заданным критериям вероятности ложной тревоги.

Апробированные в ходе исследования экспериментальные результаты подтверждают эффективность предложенного решающего правила для обнаружения малоразмерных объектов на изображениях. Достигаются приемлемые показатели вероятности правильного обнаружения (0,95) при вероятности ложной тревоги 10^{-4} , при этом отношение сигнал/шум должно составлять около 14 для успешного применения метода.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод обнаружения изображений малоразмерных объектов, основанный на вычислении отношения правдоподобия с использованием оценки математического ожидания выборок пространственно-субполосных векторов и их ковариационных матриц, является перспективным для дальнейших исследований.

Для решения задачи обнаружения малоразмерных объектов по изображениям кана-

лов технического зрения, а также для подготовки данных для последующих этапов (распознавания и идентификации в качестве основного инструмента) предлагается метод субполосного анализа на основе применения новых базисных функций.

Экспериментальная оценка качества обнаружения малоразмерных объектов вышеописанным методом показывает, что приемлемые показатели вероятности правильного обнаружения (0,95) при вероятности ложной тревоги 10^{-4} достигаются при отношении сигнал/шум более 14.

Исходя из того, что шум на изображениях не всегда является статически независимым и аддитивным, оценка влияния пространственных спектральных характеристик шума подлежит дальнейшему исследованию.

Список литературы

1. Крупский А. С., Немеров А. А., Кулбаев С. С. Классификация задач по работе с изображениями // *Фундаментальные и прикладные исследования*. 2014. № 16. С. 130–132.
2. Чабан Л. Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных. Учебное пособие. М.: МИИГАиК. 2013. 96 с.
3. Sreedhar K., Panlal B. Enhancement of Images Using Morphological Transformations // *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*. 2012. Vol 4, № 1. P. 33–50.
4. Farhat N. H., Levin B. J. Image Dissection and Conversion at Nonvisible Wavelengths // *Appl. Opt.* 1970. Vol. 9. P. 765–769.
5. Celik T., Tjahjadi T. Automatic Image Equalization and Contrast Enhancement Using Gaussian Mixture Modeling // *Transactions on Image Processing, IEEE*. 2012. Vol. 21, № 1. P. 145–156.
6. Ефимов А. И. Разработка и исследование алгоритмов совмещения изображений от бортовых видеодатчиков с виртуальной моделью местности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.17. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет. 2016. 172 с.
7. Ефимов А. И., Новиков А. И. Программно-алгоритмический комплекс совмещения изображений в авиационных системах технического зрения // *Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017)*. Самара: Новая техника, 2017. С. 400–409.
8. Chen W., Li Q., Zhang H., Sun K., Sun W., Jiao Z., Xinye N. MR-CT image fusion method of intracranial tumors based on Res2Net // *BMC Medical Imaging*. 2024. Vol. 24, № 1. doi:10.1186/s12880-024-01329-x
9. Wang Y. Image Method Based on Snake Visual Imaging and PCNN // *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 10. P. 3077. doi:10.3390/s24103077
10. Anand S., Sharma R. Pansharpening and spatiotemporal image fusion method for remote sensing // *Engineering Research Express*. 2024. Vol. 6, № 2. P. 022201. doi:10.1088/2631-8695/ad3a34
11. Sun M., Zhu X., Niu Y., Li Y. Multi-modal remote sensing image fusion method guided by local extremum maps-guided image filter // *Signal, Image and Video Processing*. 2024. Vol. 18, № 5. P. 4375–4383.
12. Li Z.-H., Jiang G.-H., Xu S.-N., Liu Y.-G. Image registration algorithm for infrared and visible images based on contour polygon fitting // *Systems Engineering and Electronics*. 2015. Vol. 37. P. 2872–2878.
13. Сырямкин В. И., Шидловский В. С. Корреляционноэкстремальные радионавигационные системы. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2010. 316 с.
14. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Балашов О. Е., Баранцев А. А., Фельдман А. Б. Технология анализа изображений для систем технического зрения летательных аппаратов // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2016. № 2 (175). С. 148–158.
15. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Стротов В. В. Анализ точностных характеристик методов слежения за фоновым изображением для бортовой видеоинформационной системы // *Вестник РГРТА*. 2007. № 20. С. 3–10.
16. Фельдман А. Б., Ерохин Д. Ю. Комплекс алгоритмов выделения и прослеживания движущихся объектов для бортовой системы технического зрения // *Цифровая обработка сигналов*. 2016. № 3. С. 8–14.

17. Павлов А. Н. Вейвлет-анализ и примеры его применения // Обзоры актуальных проблем нелинейной динамики. 2009. Т. 17, № 5. С. 99–111.
18. Samantaray A., Asritha D., Prasanna N., Lakshmi T., Jaitha P., Siva S. An Effective Image Enhancement Algorithm for Single Image Haze Removal Based on Daubechies Wavelet Filter Bank // Advances in Data-Driven Computing and Intelligent Systems. 2024. P. 251–259. doi:10.1007/978-981-99-9531-8_20
19. Wu M., Hou Y. Discrete Wavelet Analysis: A Mighty Approach for Image Segmentation // EAI Endorsed Transactions on e-Learning. 2023. Vol. 9. doi:10.4108/eetel.4266
20. Жилияков Е. Г., Лубков И. И., Болгова Е. В. Анализ и аппроксимация функций по эмпирическим данным на основе субполосных представлений // Экономика. Информатика. 2022. Т. 49 (4), № 4. С. 833–853.
21. Жилияков Е. Г., Черноморец А. А. О субполосном анализе изображений // 23-я Международная конференция по компьютерной графике и зрению (16–20 сентября 2013, Владивосток). Владивосток: Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН. 2013. С. 230–233.
22. Черноморец А. А. Об оптимальном выделении субполосных компонент изображений // ГрафиКон'2014: труды 24-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению (30 сентября – 3 октября, 2014). Ростов-на-Дону, 2014. С. 75–78.
23. Жилияков Е. Г., Черноморец А. А., Заливин А. Н. Об эффективности метода оценивания значений долей энергии изображений на основе частотных представлений // Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии. 2009. № 2/52 (563). С. 12–22.
24. Жилияков Е. Г., Черноморец А. А. О частотном анализе изображений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2010. Вып. 1. С. 94–103.
25. Жилияков Е. Г., Черноморец А. А. Об оптимальном выделении субполосных компонент изображений // Информационные системы и технологии. 2013. № 1 (75). С. 5–11.
26. Лубков И. И., Жилияков Е. Г., Трубицына Д. И., Заливин А. Н. Разработка метода субполосного сжатия изображений // Экономика. Информатика. 2022. № 49 (1). С. 195–204.
27. Черноморец Д. А., Михелев В. М., Болгова Е. В., Черноморец А. А. Субполосный анализ изображений морской поверхности на основе косинус-преобразования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 6. С. 1072–1078.
28. Ko L.-T., Chen J.-E., Hsin H.-C., Shieh Y.-S., Sung T.-Y. A Unified Algorithm for Subband-Based Discrete Cosine Transform // Mathematical Problems in Engineering. 2012. Vol. 2012, № 1. doi:10.1155/2012/912194
29. Mukherjee D. Parallel implementation of discrete cosine transform and its inverse for image compression applications // The Journal of Supercomputing. 2024. Vol. 80, № 16. P. 23712–23735. doi:10.1007/s11227-024-06343-y
30. Narasimhan S. V., Harish M., Haripriya A. R., Basumallick N. Discrete cosine harmonic wavelet transform and its application to signal compression and subband spectral estimation using modified group delay // Signal Image and Video Processing. 2008. Vol. 3, № 1. P. 85–99. doi:10.1007/s11760-008-0062-7
31. Голощапова В. А., Заливин А. Н., Маматов Е. М., Олейник И. И. Экспериментальные исследования по распознаванию малоразмерных объектов на видеоизображениях при использовании многомерных пространственно-субполосных векторов // Экономика. Информатика. 2022. Т. 49, № 2. С. 432–440.
32. Олейник И. И. Исследование решающих правил распознавания объектов в малобазовой поляризационной измерительной системе при субполосной обработке сигналов // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47, № 3. С. 648–660.
33. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47, № 2. С. 423–431.
34. Burdanova E. V., Zhilyakov E. G., Oleynik I. I., Mamatov A. V., Nemtsev A. N. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals // OMPUSOFT, An international journal of advanced computer technology. 2019. Vol. 8, № 6. P. 3166–3170.
35. Черноморец А. А., Болгова Е. В., Черноморец Д. А. О квазисубполосных матрицах косинуспреобразования // Научный результат. Информационные технологии. 2019. Т. 4, № 3. С. 11–19.

36. Жилыков Е. Г. Оптимальные субполосные методы анализа и синтеза сигналов конечной длительности // Автоматика и телемеханика. 2015. № 4. С. 51–66.
37. Zhilyakov E. G., Belov S. P., Oleinik I. I., Prokhorenko E. I. Regularization of Inverse Signal Recovery Problems // HELIX the Scientific Explorer. 2019. Vol. 9 (2). P. 4883–4889.
38. Oleynik I. I., Tsurkan A. N. Calibration of video surveillance systems using multidimensional information representations // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (May 2, 2020). Birmingham: Scientific publishing house Infinity. 2020. P. 260–265.

Поступила в редакцию 31.03.2025, окончательный вариант — 05.04.2025.

Попов Александр Николаевич, аспирант, кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, НИУ «БелГУ», ✉ I.boris-bleb@yandex.ru

Computer tools in education, 2025

№ 1: 33–47

<http://cte.eltech.ru>

[doi:10.32603/2071-2340-2025-1-33-47](https://doi.org/10.32603/2071-2340-2025-1-33-47)

Analysis of Image Processing Methods in the Context of a Basis for Recognizing Small Objects. Image processing methods for object recognition

Popov A. N.¹, Postgraduate, ✉ I.boris-bleb@yandex.ru, orcid.org/0009-0004-8322-8584

¹Belgorod State National Research University, 85 Pobedy Street, 308015, Belgorod, Russia

Abstract

The article analyzes the existing methods of detecting small objects from images in the channels of technical vision against a background of noise. It is shown that the method of detecting images of small objects based on the calculation of the likelihood ratio using the estimation of the mathematical expectation of samples of spatially subband vectors and their covariance matrices is promising for further research. To solve the problem of detecting small objects from images of technical vision channels, as well as to prepare data for subsequent stages (recognition and identification), a subband analysis method based on the use of new basic functions is proposed as the main tool. An experimental assessment of the quality of detection of small-sized objects using the above-described method has been carried out, showing that acceptable indicators of the probability of correct detection (0.95) with a false alarm probability of 10^{-4} are achieved with a signal-to-noise ratio of more than 14. Based on the fact that noise in images is not always statically independent and additive, the assessment of the influence of spatial spectral characteristics of noise is subject to further investigation. The analysis of the influence of a statistically independent additive noise process on the quality of detection and cognition is carried out. In this case, a set of source images containing images of small objects of the type of unmanned aerial vehicles was used. To search for an object in the analyzed image, a reference image of the object was used. In the course of the study, it was found that the family of dependencies of the probability of correct detection on the signal-to-noise ratio, taking into account the given probability of a false alarm when exposed to additive white noise, is a classic type characteristic of object detection algorithms. The necessary signal-to-noise ratio has

been identified, which makes it possible to achieve an acceptable probability of correct detection.

Keywords: *photo and video images, methods and algorithms for synthesis, analysis and improvement of image quality, machine vision, subband methods.*

Citation: A. N. Popov, "Analysis of Image Processing Methods in the Context of a Basis for Recognizing Small Objects. Image processing methods for object recognition," *Computer tools in education*, no. 1, pp. 33–47, 2025 (in Russian); doi:10.32603/2071-2340-2025-1-33-47

References

1. A. S. Krupskii, A. A. Nemerov, and S. S. Kulbaev, "Klassifikatsiya zadach po rabote s izobrazheniyami" [Classification of image manipulation tasks], *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya*, no. 16, pp. 130–132, 2014 (in Russian).
2. L. N. Chaban, *Avtomatizirovannaya obrabotka aerokosmicheskoi informatsii pri kartografirovanii geoprostranstvennykh dannykh. Tutorial* [Automated processing of aerospace information in geospatial data mapping. Tutorial], Moscow: MIIGAiK, 2013 (in Russian).
3. K. Sreedhar and B. Panlal, "Enhancement of Images Using Morphological Transformations," *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, vol. 4, no. 1, pp. 33–50, 2012.
4. N. H. Farhat and B. J. Levin, "Image Dissection and Conversion at Nonvisible Wavelengths," *Appl. Opt.*, vol. 9, pp. 765–769, 1970.
5. T. Celik and T. Tjahjadi, "Automatic Image Equalization and Contrast Enhancement Using Gaussian Mixture Modeling," *Transactions on Image Processing. IEEE*, vol. 21, no. 1, pp. 145–156, 2012.
6. A. I. Efimov, "Razrabotka i issledovanie algoritmov sovmeshcheniya izobrazhenii ot bortovykh videodatchikov s virtual'noi model'yu mestnosti," *Dissertation of Candidate of Technical Sciences: 05.13.17*, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia, 2016 (in Russian).
7. A. I. Efimov and A. I. Novikov, "Programmno-algoritmicheskii kompleks sovmeshcheniya izobrazhenii v aviatsionnykh sistemakh tekhnicheskogo zreniya" [Program-algorithmic complex of safety assurance in aviation vision systems], in *Proc of the III International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2017)*, Samara: Novaya tekhnika, pp. 400–409, 2017 (in Russian).
8. W. Chen et al., "MR–CT image fusion method of intracranial tumors based on Res2Net," *BMC Medical Imaging*, vol. 24, no. 1, 2024; doi:10.1186/s12880-024-01329-x
9. Q. Wang et al., "Image Fusion Method Based on Snake Visual Imaging Mechanism and PCNN," *Sensors*, vol. 24, no. 10, p. 3077, 2024; doi:10.3390/s24103077
10. S. Anand and R. Sharma, "Pansharpening and spatiotemporal image fusion method for remote sensing," *Engineering Research Express*, vol. 6, no. 2, p. 022201, 2024; doi:10.1088/2631-8695/ad3a34
11. M. Sun et al., "Multi-modal remote sensing image fusion method guided by local extremum maps-guided image filter," *Signal, Image and Video Processing*, vol. 18, no. 5, pp. 4375–4383, 2024; doi:10.1007/s11760-024-03079-3
12. Z.-H Li et al., "Image registration algorithm for infrared and visible images based on contour polygon fitting," *Systems Engineering and Electronics*, vol. 37, pp. 2872–2878, 2015.
13. V. I. Syryamkin and V. S. Shidlovskii, *Korrelyatsionnoekstremal'nye radionavigatsionnye sistemy* [Correlation-extreme radionavigation systems], Tomsk, Russia: Izd-vo Tom. un-ta. 2010 (in Russian).
14. B. A. Alpatov, P. V. Babayan, O. E. Balashov, A. A. Barantsev, and A. B. Fel'dman "Tekhnologiya analiza izobrazhenii dlya sistem tekhnicheskogo zreniya letatel'nykh apparatov," [Image analysis technology for the system of technical zoning of flight vehicles], *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 2 (175), pp. 148–158, 2016 (in Russian).
15. B. A. Alpatov, P. V. Babayan, and V. V. Strotov, "Analiz tochnostnykh kharakteristik metodov slezheniya za fonovym izobrazheniem dlya bortovoi videoinformatsionnoi sistemy" [Accurate characterization analysis of background image sleep methods for an on-board video information system], *Vestnik RGRU*, no. 20, pp. 3–10, 2007 (in Russian).

16. A. B. Fel'dman and D. Yu. Erokhin, "Kompleks algoritmov vydeleniya i proslezhivaniya dvizhushchikhsya ob"ektov dlya bortovoi sistemy tekhnicheskogo zreniya," *Tsifrovaya obrabotka signalov*, no. 3, pp. 8–14, 2016 (in Russian).
17. A. N. Pavlov, "Veivlet-analiz i primery ego primeneniya" [Wavelet analysis and ego-application fitting], *Obzory aktual'nykh problem nelineinoi dinamiki*, vol. 17, no. 5, pp. 99–111, 2009.
18. A. K. Samantarayet et al, "An Effective Image Enhancement Algorithm for Single Image Haze Removal Based on Daubechies Wavelet Filter Bank," *Advances in Data-Driven Computing and Intelligent Systems*, pp. 251–259, 2024; doi:10.1007/978-981-99-9531-8_20
19. M. Wu and Y. Hou, "Discrete Wavelet Analysis: A Mighty Approach for Image Segmentation," *EAI Endorsed Transactions on e-Learning*, vol. 9, 2023; doi:10.4108/etel.4266
20. E. G. Zhilyakov, I. I. Lubkov, and E. V. Bolgova, "Analiz i approksimatsiya funktsii po empiricheskim dannym na osnove subpolosnykh predstavlenii" [Analysis and approximation of functions by empirical data based on subband predictions], *Economics. Information Technologies*, vol. 49, no. 4, pp. 833–853, 2022 (in Russian).
21. E. G. Zhilyakov and A. A. Chernomorets, "O subpolosnom analize izobrazhenii" [On subband image analysis], in *Proc. of 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, Sep. 16-20, 2013, Vladivostok, Russia*, pp. 230–233, 2013 (in Russian).
22. A. A. Chernomorets, "Ob optimal'nom vydelenii subpolosnykh komponent izobrazhenii," [On optimal extraction of subband components of an image], in *Proc. of 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, Sep. 30 – Oct. 3, 2014, Rostov-on-Don, Russia*, pp. 75–78, 2014 (in Russian).
23. E. G. Zhilyakov, A. A. Chernomorets, and A. N. Zalivin, "Ob effektivnosti metoda otsenivaniya znachenii dolei energii izobrazhenii na osnove chastotnykh predstavlenii" [Ob effektivnosti metoda otsenivaniya znachenii dolei energii izobrazhenii na osnove chastotnykh predstavlenii], *Izvestiya OrelGTU. Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, vol. 2/52, no. 563, pp. 12–22, 2009 (in Russian).
24. E. G. Zhilyakov and A. A. Chernomorets, "O chastotnom analize izobrazhenii," *Voprosy radioelektroniki. Ser. EVT.*, vol. 1, pp. 94–103, 2010 (in Russian).
25. E. G. Zhilyakov and A. A. Chernomorets, "Ob optimal'nom vydelenii subpolosnykh komponent izobrazhenii," [On optimal extraction of subband components of an image], *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, no. 1 (75), pp. 5–11, 2013 (in Russian).
26. I. I. Lubkov, E. G. Zhilyakov, D. I. Trubitsyna, and A. N. Zalivin, "Razrabotka metoda subpolosnogo szhatiya izobrazhenii" [Development of a method for subband image storage], *Economics. Information Technologies*, no. 49(1), pp. 195–204, 2022 (in Russian).
27. D. A. Chernomorets, V. M. Mikhelev, E. V. Bolgova, and A. A. Chernomorets, "Subpolosnyi analiz izobrazhenii morskoi poverkhnosti na osnove kosinus-preobrazovaniya," [Subband analysis of moral surface images based on cosine transformer], *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, vol. 19, no. 6, pp. 1072–1078, 2019.
28. L.-T. Ko et al., "A Unified Algorithm for Subband-Based Discrete Cosine Transform," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, no. 1, 2011; doi:10.1155/2012/912194
29. D. Mukherjee, "Parallel implementation of discrete cosine transform and its inverse for image compression applications," *The Journal of Supercomputing*, vol. 80, no. 16, pp. 23712–23735, 2024; doi:10.1007/s11227-024-06343-y
30. S. V. Narasimhan, M. Harish, A. R. Haripriya, and N. Basumallick, "Discrete cosine harmonic wavelet transform and its application to signal compression and subband spectral estimation using modified group delay," *Signal, Image and Video Processing*, vol. 3, no. 1, pp. 85–99, 2008; doi:10.1007/s11760-008-0062-7
31. V. A. Goloshchapova, A. N. Zalivin, E. M. Mamatov, and I. I. Oleinik, "Eksperimental'nye issledovaniya po raspoznavaniyu malorazmernykh ob"ektov na videoizobrazheniyakh pri ispol'zovanii mnogomernykh prostranstvenno-subpolosnykh vektorov" [Experimental studies on detecting malignant objects in video recordings when performing multidimensional spatial-subband vectors], *Economics. Information Technologies*, vol. 49, no. 2, pp. 432–440, 2022 (in Russian).
32. I. I. Oleinik, "Issledovanie reshayushchikh pravil raspoznavaniya ob"ektov v malobazovoi polyarizatsionnoi izmeritel'noi sisteme pri subpolosnoi obrabotke signalov" [Investigation of decisive rules for propagation of information about "ects" in small-base polarization measurement system at

- subband signal processing], *Economics. Information Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 648–660, 2020 (in Russian).
33. I. I. Oleinik, “Predstavlenie signalov pri obrabotke informatsii v malobazovoi polarizatsionnoi izmeritel’noi sisteme” [Signal propagation during information processing in a small-baseline polarization measurement system], *Economics. Information Technologies*, vol. 47, no. 2, pp. 423–431, 2020 (in Russian).
 34. E. V. Burdanova, E. G. Zhilyakov, I. I. Oleynik, A. V. Mamatov, and A. N. Nemtsev, “Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals,” *OMPUSOFT, An international journal of advanced computer technology*, vol. 8, no. 6, pp. 3166–3170, 2019.
 35. A. A. Chernomorets, E. V. Bolgova, and D. A. Chernomorets, “O kvazisubpolosnykh matritsakh kosinuspreobrazovaniya” [On quasi-subband cosine transform matrices], *Nauchnyi rezul’tat. Informatsionnye tekhnologii*, vol. 4, no. 3, pp. 11–19, 2019 (in Russian).
 36. E. G. Zhilyakov, “Optimal’nye subpolosnye metody analiza i sinteza signalov konechnoi dlitel’nosti” [Optimal subband methods for analysis and synthesis of finite duration signals], *Automation and Remote Control*, no. 4, pp. 51–66, 2015 (in Russian).
 37. E. G. Zhilyakov, S. P. Belov, I. I. Oleinik, and E. I. Prokhorenko, “Regularization of Inverse Signal Recovery Problems,” *HELIX the Scientific Explorer*, vol. 9 (2), pp. 4883–4889, 2019.
 38. I. I. Oleynik and A. N. Tsurkan, “Calibration of video surveillance systems using multidimensional information representations,” in *Proc. of Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, May 2, 2020)*, pp. 260–265, 2020.

Received 31-03-2025, the final version — 05-04-2025.

Alexander Popov, Postgraduate, Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, BelSU, ✉ I.boris-bleb@yandex.ru