

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи

Умнов Алексей Витальевич

**МЕТОДЫ РАЗРЕЖЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДЛЯ
ОБНАРУЖЕНИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА ЛОЖНОГО
ОКОНТУРИВАНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва 2018

Научный руководитель: **Крылов Андрей Серджевич**
доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической физики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты: **Еленин Георгий Георгиевич**
доктор физико-математических наук, профессор ка-
федры вычислительных методов факультета вычисли-
тельной математики и кибернетики Московского госу-
дарственного университета имени М.В. Ломоносова.

Визильтер Юрий Валентинович
доктор физико-математических наук, профессор кафедры 301 «Системы автоматического и интеллектуального управления», Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем».

Замарашкин Николай Леонидович
кандидат физико-математических наук, старший науч-
ный сотрудник института вычислительной математики
им. Г.И. Марчука Российской Академии Наук.

Защита диссертации состоится «28» ноября 2018 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета МГУ.01.09 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 52, факультет ВМК, ауд. 685.

E-mail: ilgova@cs.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «Истина»: [http://istina.msu.ru/dissertations/...](http://istina.msu.ru/dissertations/)

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Захаров Е.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В связи с быстрым ростом производительности вычислительной техники цифровая обработка и анализ изображений в настоящее время играют большую роль во множестве приложений. Однако несовершенство формирующих и регистрирующих систем, а также некоторые алгоритмы обработки могут приводить к искажениям изображений, затрудняющим работу с ними. Для борьбы с подобными проблемами могут использоваться методы математического моделирования, позволяющие частично восстанавливать искаженные изображения. Актуальность проблемы подтверждается многочисленными исследованиями на эту тему в современной литературе.

Одним из подобных искажений является эффект ложного оконтуривания, связанный с эффектом Гиббса, и появляющийся при потере или искажении высокочастотной информации на изображении. Эффект ложного оконтуривания возникает в задачах обработки медицинских или аэрокосмических изображений и при сжатии изображений или видео. Задача подавления этого эффекта важна в данных приложениях, так как часто в них отсутствует возможность получения изображения высокого качества, или же этот процесс является очень ресурсоемким. Также иногда требуется автоматическая оценка качества изображений, поэтому возникает задача обнаружения эффекта ложного оконтуривания.

Сложность данных задач обуславливается трудностью моделирования реальных изображений из-за наличия на них разнообразных деталей; при этом алгоритмы обработки должны сохранять содержимое и важные аспекты изображений, и не должны вносить новых искажений. Дополнительная трудность заключается в том, что эффект ложного оконтуривания может быть внешне похож на какие-то детали изображений, что усложняет как задачу обнаружения, так и задачу подавления этого эффекта. На данный

момент задачи обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания не являются решенными.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка и программная реализация алгоритмов обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания на изображениях на основе моделирования эффекта ложного оконтуривания с помощью эффекта Гиббса, и анализ используемого в работе метода разреженных представлений для изображений с эффектом ложного оконтуривания.

Научная новизна работы

1. Разработан алгоритм обнаружения эффекта ложного оконтуривания на изображениях на основе метода разреженных представлений.
2. Предложены два метода подавления эффекта ложного оконтуривания, применимые для различных параметров эффекта ложного оконтуривания.
3. Проведено исследование метода разреженных представлений для использования его при работе с эффектом ложного оконтуривания, шумом и размытием.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Создан программный комплекс для обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания на изображениях.
2. Разработанные методы обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания могут быть использованы как составная часть комплексных алгоритмов анализа и обработки изображений.

Апробация работы

Основные результаты докладывались и обсуждались на:

- 11-й международной конференции по анализу и распознаванию изображений («International Conference on Image Analysis and Recognition», ICIAR), Виламура, Португалия, 2014 [6];
- 12-й международной конференции по обработке сигналов («International Conference on Signal Processing», ICSP), Ханчжоу, Китай, 2014 [5];
- Международной конференции по продвинутым концепциям интеллектуальных систем технического зрения («Advanced Concepts of Intelligent Visual Systems», ACIVS), Катания, Италия, 2015 [4];
- Конференции «Тихоновские чтения 2015», ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова (Москва, 2015);
- Заседании кафедры математической физики факультета ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 2015 г.
- Международном научно-исследовательском семинаре «Анализ и понимание изображений (Математические, когнитивные и прикладные проблемы анализа изображений и сигналов)» ФИЦ ИУ РАН, Москва, 2017.
- Международной конференции по применению разреженных представлений для приложений в мультимедиа, биомедицине и коммуникациях («Compressive sensing based trends applied to: multimedia, biomedicine and communications»), Будва, Черногория, 2017.

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, из них:

- Работы [1–4] опубликованы в журналах Scopus, WoS, RSCI.
- Работы [5; 6] опубликованы в трудах конференций и индексируются в системе Scopus.

Личный вклад

Личный вклад автора состоит в разработке математической модели для эффекта ложного оконтуривания на изображениях, разработке численных методов для обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания, а также их программной реализации. Все основные результаты опубликованы в работах [1–6].

Во всех работах автором задач является научный руководитель Крылов А. С.

Умнов А.В. является автором алгоритмов и комплексов программ в работах [1–5].

В работах [1–3] материалы для публикации были подготовлены Умновым А.В. самостоятельно.

В работах [4; 5] Насонов А.В. составил обзор, остальные материалы были подготовлены Умновым А.В.

В работе [6] Умнов А.В. является автором одной из частей представленного алгоритма, Насонова А.В. и Печенко И. проводили исследования по другой части алгоритма, Насонов А.В. составил обзор и подготовил материалы для публикации, Махнеева Н.В. предоставила медицинские данные и консультации.

Автор диссертации благодарит научного руководителя Крылова Андрея Серджевича за постановку задач, за ценные указания и консультации в

процессе работы над ними, за критические замечания к тексту диссертации и автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Объем работы — 113 страниц. Список литературы включает 80 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Предложен и исследован метод математического моделирования эффекта ложного оконтуривания на изображениях с использованием метода разреженных представлений.
2. Разработаны и численно реализованы алгоритмы обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания на изображениях.
3. Создан программный комплекс для обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания на изображениях.

Содержание работы

Во **введении** дается обоснование актуальности темы диссертации, ставятся цели диссертационного исследования, и кратко описывается содержание диссертации.

В **первой главе** рассматривается задача обнаружения эффекта ложного оконтуривания и разрабатывается алгоритм ее решения на основе моделирования эффекта ложного оконтуривания с помощью эффекта Гиббса. Для построения алгоритма используется метод разреженных представлений.

В первом параграфе описывается эффект ложного оконтуривания, который появляется при потере или искажении высокочастотной информации на изображении. Рассматривается связь этого эффекта с эффектом Гиббса, а также возможные источники его возникновения. Строится модель эффекта ложного оконтуривания на основе эффекта Гиббса. Приводится обзор методов для обнаружения эффекта ложного оконтуривания, в том числе рассматривается метод на основе вычисления полной вариации изображения, применимый к любому эффекту ложного оконтуривания вне зависимости от причины его возникновения. Полной вариацией двухмерной функции $I(x, y)$ (изображения) в прямоугольной области $x \in [a; b]$, $y \in [c; d]$ называется следующая величина:

$$\text{TV}(I) = \int_a^b \int_c^d \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \, dx dy.$$

Также в целях повышения эффективности может использоваться полная вариация для одномерных функций, вычисляемая вдоль профилей контуров изображений. Пусть задана функция $f(x)$, тогда ее полной вариацией на отрезке $x \in [a; b]$ называется следующая величина:

$$\text{TV}(f) = \int_a^b |f'(x)| \, dx.$$

Основная идея методов на основе полной вариации заключается в том, что с ростом силы эффекта ложного оконтуривания на изображении растет и значение полной вариации этого изображения.

Во втором параграфе рассматривается метод разреженных представлений и его приложения для различных задач. Основная идея метода заключается в моделировании обрабатываемого сигнала (в данном случае изображения или блока изображения) как линейной комбинации небольшого числа сигналов из заранее выбранного избыточного словаря. Обозначим сигнал как y , словарь как D , искомое представление как s и максимально допустимую ошибку представления как ε . Тогда, обозначая количество

ненулевых элементов в векторе c как $\|c\|_0$, задача разреженного представления может формулироваться так:

$$\|c\|_0 \rightarrow \min \quad \text{при условии} \quad \|y - Dc\|_2^2 \leq \varepsilon.$$

Полученное представление c на практике обычно содержит всю наиболее важную информацию о сигнале. В общем случае эта задача является NP-полной, но существуют эффективные алгоритмы приближенного решения этой задачи. Одним из таких алгоритмов является «жадный» алгоритм, который последовательно добавляет наиболее подходящие коэффициенты в представление до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность. Избыточный словарь для представлений может выбираться различными способами в зависимости от задачи. Один распространенных подходов — конструировать словарь в виде объединения нескольких наборов базисных функций (например, базис дискретного преобразования Фурье и набор вейвлетов Хаара). Другой подход — построение словаря на наборе типичных изображений — подробно рассматривается во второй главе.

В третьем параграфе представлен алгоритм для обнаружения эффекта ложного оконтуривания на основе метода разреженных представлений. Эффект ложного оконтуривания наиболее заметен вблизи резких контуров на изображении, поэтому основная идея алгоритма заключается в построении словаря, предназначенного для обработки блоков в этих областях. Показывается, что резкие контуры с эффектом ложного оконтуривания могут быть достаточно точно смоделированы в виде суммы идеального контура, размытого с гауссовским ядром, и чистого эффекта ложного оконтуривания, на рис. 1 изображено такое разложение для профилей контуров. При этом ширина осцилляций d чистого эффекта Гиббса и дисперсия гауссовского ядра σ связаны соотношением $\sigma \approx 0.336d$. Таким образом словарь составляется из двух частей. В первой части находятся блоки с идеальными контурами с различными степенями размытия, а во второй — блоки с

чистым эффектом ложного оконтуривания с различной шириной осцилляции. Для каждой такой пары в словарь также добавляются их повернутые версии.

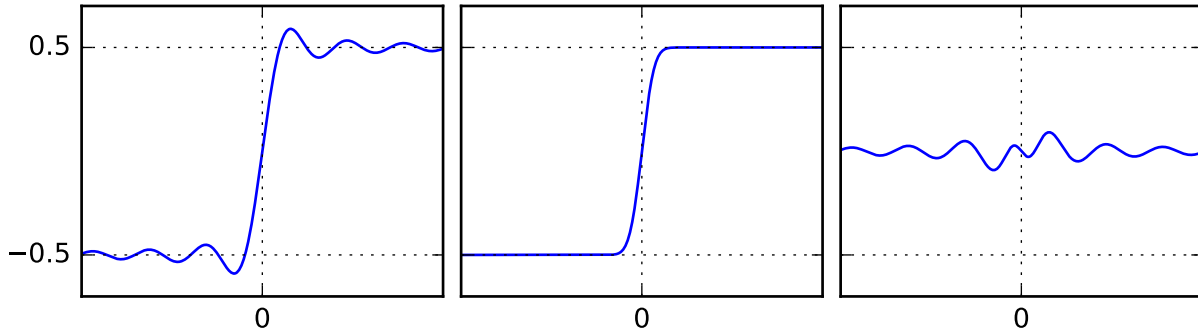


Рис. 1: Пример отделения чистого эффекта ложного оконтуривания от размытого контура: исходный контур с эффектом ложного оконтуривания (слева), ближайший размытый контур (в центре), чистый эффект ложного оконтуривания (справа).

Алгоритм обнаружения эффекта ложного оконтуривания устроен следующим образом. Для каждого блока на изображении строится разложение этого блока по построенному словарю. Блоки, для которых ошибка разложения выше некоторого порога, или у которых есть соседние с ними блоки со значительно меньшей ошибкой разложения, исключаются из рассмотрения. Это нужно для того, чтобы не рассматривать блоки без контуров и блоки, где контур не центрирован. Для оставшихся блоков рассматриваются их разложения по словарю и на основе них строится интегральная метрика силы эффекта ложного оконтуривания.

Предложенная метрика работает лучше метода на основе полной вариации на наборах изображений с произвольным эффектом ложного оконтуривания, и показывает хорошие результаты, сравнимые с другими методами, на наборах с эффектом ложного оконтуривания, получаемого в результате сжатия изображений алгоритмом сжатия JPEG2000.

Вторая глава посвящена задаче подавления эффекта ложного оконтуривания и построению алгоритмов ее решения на основе моделирования

эффекта ложного оконтуривания с помощью эффекта Гиббса. Для построения алгоритмов используется метод разреженных представлений.

В первом параграфе приводится обзор методов подавления эффекта ложного оконтуривания. Существующие методы, работающие с чистым эффектом ложного оконтуривания, основаны на связи эффекта ложного оконтуривания и полной вариации. Один из возможных методов подавления решает следующую задачу минимизации для восстановления изображения:

$$I^* = \arg \min_I (\|I - I_r\|_2^2 + \gamma \text{TV}(I)) ,$$

где I_r — входное изображение с эффектом ложного оконтуривания, I^* — восстановленное изображение, γ — регуляризирующий параметр.

Во втором параграфе рассматривается задача построения словаря по набору сигналов. Эта задача расширяет метод разреженных представлений, позволяя строить словарь по набору типичных данных, что как правило позволяет получить более точную модель сигналов. Пусть матрица Y — набор сигналов (записанных в виде столбцов матрицы), матрица C — неизвестный набор представлений этих сигналов (дополнительно обозначим c_i — i -й столбец этой матрицы), матрица D — искомый словарь, и ε — максимально допустимая ошибка представления. Тогда задача построения словаря может формулироваться следующим образом:

$$\min_{D, C} \sum_i \|c_i\|_0 \quad \text{при условии} \quad \|Y - DC\|_2^2 \leq \varepsilon.$$

В общем случае эта задача является NP-полной, поэтому для ее решения используются приближенные алгоритмы. Один из них — алгоритм K-SVD — поочередно решает задачу относительно C с зафиксированным значением D (в этом случае задача превращается в набор независимых задач разреженного представления) и относительно отдельных столбцов D и соответствующих им элементов C с зафиксированными остальными элементами D

и C (в этом случае задача решается с помощью сингулярного разложения матрицы ошибки). На практике такой подход дает хорошие результаты.

Построенные таким образом словари можно использовать для подавления искажений изображений. Для этого нужно построить словарь по набору естественных изображений без искажений, использовать этот словарь для построения представлений для изображений с искажениями, а потом восстановить изображение по представлению. Тогда разница между восстановленным изображением и исходным будет в большой мере состоять из чистых искажений (так как все остальные элементы хорошо представляется словарем). Такой подход позволяет удалять некоторые искажения (например, шум или отсутствующие пиксели), однако недостаточно хорошо работает для таких, для которых искажения соседних пикселей не являются независимыми (например, размытие или эффект ложного оконтуривания). Для решения подобных задач используется расширение описанного подхода — построение объединенных словарей, моделирующих произвольное преобразование изображений. По набору сигналов без искажений Y_1 и соответствующих им сигналов с искажениями Y_2 строятся два словаря D_1 и D_2 и общий набор представлений C , такие, что одно и то же представление c_i при умножении на словарь D_1 приближает i -й сигнал из Y_1 , а при умножении на словарь D_2 приближает i -й сигнал из Y_2 . Задачу построения объединенных словарей можно сформулировать так:

$$\min_{D_1, D_2, C} \sum_i \|c_i\|_0 \quad \text{при условии} \quad \|Y_1 - D_1 C\|_2^2 + \|Y_2 - D_2 C\|_2^2 \leq \varepsilon.$$

Известно, что данная задача с помощью преобразования сигналов сводится к исходной задаче обучения словарей и поэтому также может решаться с помощью алгоритма K-SVD. Для подавления рассматриваемого искажения на изображении y необходимо построить разреженное представление c для этого изображения по словарю D_2 и использовать это представление

для получения приближения исходного изображения: $\hat{y} = D_1 c$.

Следующий раздел главы посвящен анализу разреженности представлений и взаимной согласованности для изображений. Пусть x, y — действительные векторы, тогда их взаимной согласованностью $\mu(x, y)$ будем называть следующую величину:

$$\mu(x, y) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{|(x, y)|}{\|x\|_2 \|y\|_2}.$$

Доказывается, что взаимная согласованность случайных векторов уменьшается с ростом их размерности n как функция $1/\sqrt{n}$. Исходя из этого показывается, что с ростом количества компонент в изображениях (например, с ростом их размера) уменьшается их средняя согласованность. На практике, как правило, уменьшение взаимной согласованности набора сигналов приводит к увеличению необходимого количества ненулевых коэффициентов в представлениях для этого сигнала.

В третьем параграфе предлагаются алгоритмы подавления эффекта ложного оконтуривания с помощью методов разреженных представлений.

Первый из методов основан на моделировании эффекта ложного оконтуривания с помощью объединенных словарей для обычных изображений и изображений с эффектом ложного оконтуривания. Первым этапом алгоритма на основе объединенных словарей является преобразование изображения с эффектом ложного оконтуривания по описанной выше схеме с помощью объединенных словарей D_1 (для обычных изображений) и D_2 (для изображений с эффектом ложного оконтуривания). Такой алгоритм дает хорошие результаты, в частности, в отличие от методов, основанных на минимизации полной вариации, он хорошо сохраняет мелкие детали на изображении. Однако метод размывает резкие контуры на изображении, поэтому для улучшения результатов используется гибридный метод, объединяющий данный метод и метод на основе минимизации полной вариации. Для этого на изображении ищутся контуры, и для восстановления

областей вблизи этих контуров используются результаты метода на основе полной вариации, а для всех остальных областей — результаты метода на основе объединенных словарей.

Далее производится анализ метода разреженных представлений при его применении к изображениям с эффектом ложного оконтуривания, шумом и размытием. Доказывается, что моделирование чистого эффекта Гиббса для случайных векторов в среднем уменьшает их взаимную согласованность, то есть если X, Y — случайные нормально распределенные независимые векторы, а G — оператор, моделирующий эффект Гиббса, то

$$\mathbb{E}(\mu(G(X), G(Y))) > \mathbb{E}(\mu(X, Y)).$$

Исходя из этого показывается, что добавление размытия или эффекта ложного оконтуривания на изображении в среднем уменьшает количество коэффициентов, требуемых для представления изображения, а добавление шума на изображение увеличивает количество коэффициентов. На рис. 2 изображен график зависимости разреженности от допустимой ошибки представления для различных уровней эффекта ложного оконтуривания. Поэтому при использовании одинакового количества коэффициентов для изображений с эффектом ложного оконтуривания и без него ошибки восстановления неизбежны: либо для изображений с эффектом ложного оконтуривания будет использоваться больше коэффициентов, чем необходимо, и это приведет к неустойчивости представления, либо для изображений без эффекта ложного оконтуривания будет использоваться меньше коэффициентов, чем нужно, и это приведет к размытию изображения (восстанавливаются только крупные детали). Предполагается, что именно этот эффект приводит к размытию изображений в описанном выше методе.

Второй метод подавления эффекта ложного оконтуривания основан на моделировании эффекта ложного оконтуривания с помощью словаря из двух независимых частей для устранения проблемы, описанной выше. Пер-

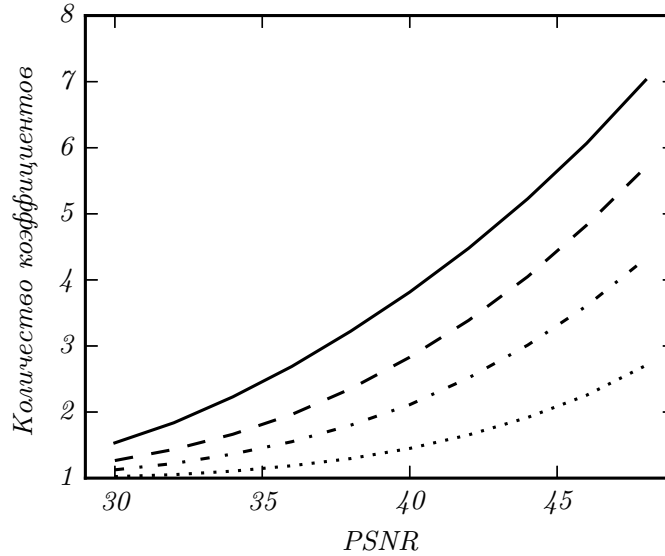


Рис. 2: Изменение разреженности при добавлении эффекта ложного оконтуривания; сплошная линия соответствует изображениям без искажения, штриховая, штрихпунктирная и точечная соответствуют изображениям с эффектом ложного оконтуривания с силой искажения $d = 1.5, 2, 3$ соответственно.

вый словарь моделирует изображения без эффекта ложного оконтуривания и строится по набору обычных изображений. Второй словарь моделирует чистый эффект ложного оконтуривания, который получается вычитанием изображения без эффекта ложного оконтуривания из соответствующего изображения с эффектом ложного оконтуривания. Для увеличения количества необходимых для представления коэффициентов перед обучением к изображениям применяется повышение резкости (можно показать, что оно, как и шум на изображении, увеличивает количество коэффициентов в представлении). Для удаления эффекта ложного оконтуривания с нового изображения необходимо применить к нему повышение резкости, построить его представление по объединенному словарю и откинуть коэффициенты, соответствующие чистому эффекту ложного оконтуривания.

Эффективность разработанных методов проверяется с помощью сравнения результатов с исходным изображением с помощью метрики близости

SSIM на наборах изображений с различными уровнями эффектами ложного оконтуривания. Показывается, что оба разработанных метода дают более качественные результаты, чем метод, основанный на полной вариации. При этом второй метод наиболее эффективен в областях контуров изображения, а первый метод хорошо работает во всех остальных областях изображения, в том числе для текстур с мелкими деталями. Также второй метод лучше работает при более высоких уровнях эффекта ложного оконтуривания, а первый метод — для более низких. Примеры обработки для всех методов изображены на рис. 3.

В **третьей главе** дается описание разработанного программного комплекса, включающего в себя реализацию разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта ложного оконтуривания, графический интерфейс для применения этих алгоритмов, а также набор вспомогательных модулей для работы с изображениями, эффектом ложного оконтуривания и методом разреженных представлений.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

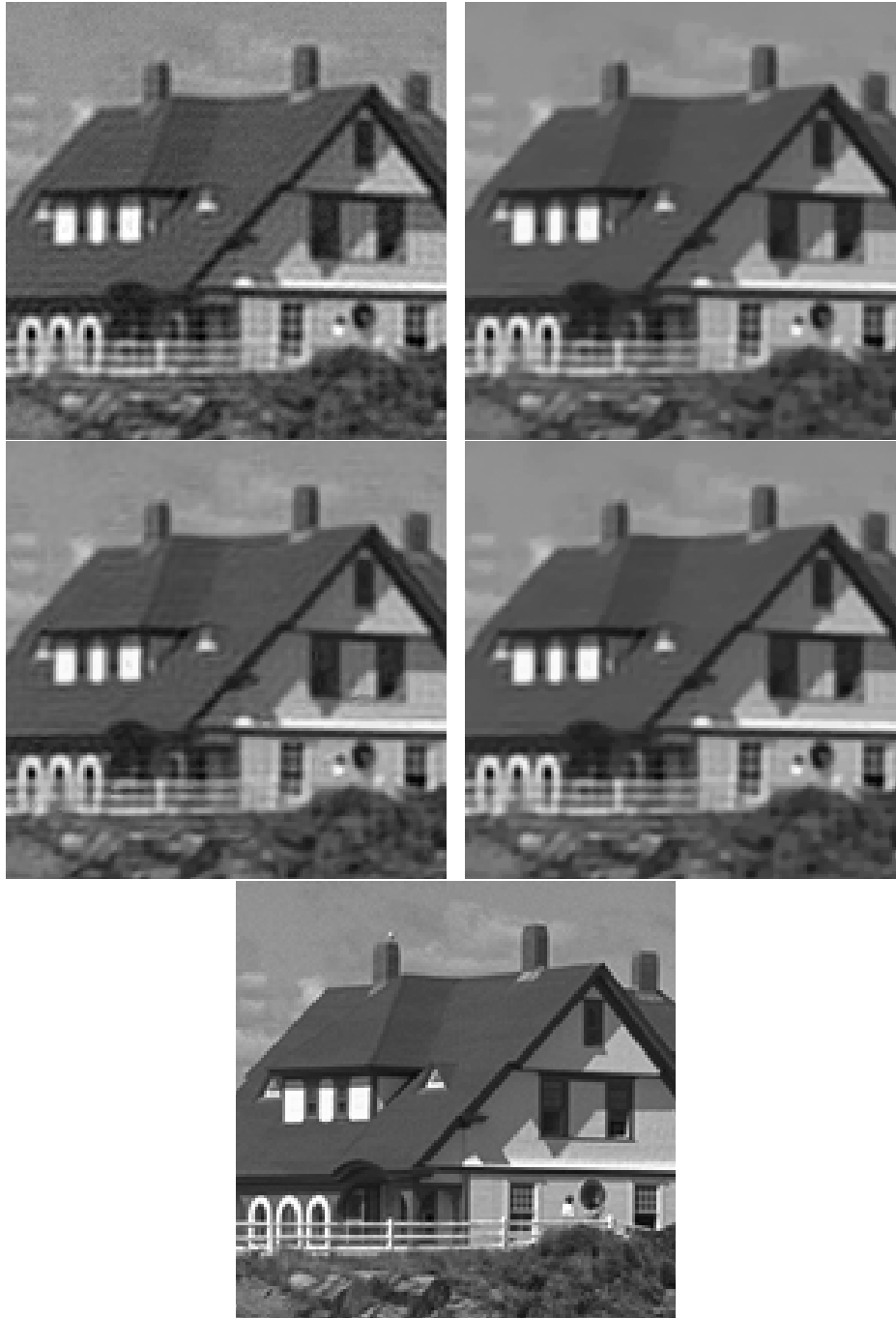


Рис. 3: Примеры обработки изображения с сильным эффектом ложного оконтуривания различными методами. В порядке слева-направо и сверху-вниз приведены: изображение с эффектом ложного оконтуривания ($d = 2.5$), результаты обработки методом на основе TV, результаты обработки методом на основе объединенных словарей, результаты обработки методом на основе независимых словарей, исходное изображение.

Публикации по теме диссертации

1. *Umnov A., Krylov A.* Sparse Approach to Image Ringing Detection and Suppression // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2017. — Vol. 27, no. 4. — Pp. 754–762.
2. *Умнов А., Крылов А.* Исследование метода разреженных представлений для подавления эффекта ложного оконтуривания // Компьютерная оптика. — 2016. — т. 40, № 6. — с. 895–903.
3. *Крылов А., Умнов А.* Влияние эффекта Гиббса на взаимную согласованность в методе разреженных представлений для изображений // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. — 2016. — № 4. — с. 10–15.
4. *Umnov A., Krylov A., Nasonov A.* Ringing artifact suppression using sparse representation // Lecture Notes in Computer Science. — 2015. — Vol. 9386. — Pp. 35–45.
5. Sparse method for ringing artifact detection / A. Umnov [et al.] // Proceedings of International Conference on Signal Processing (ICSP'2014). — 2014. — Pp. 662–667.
6. Image warping in dermatological image hair removal / A. Nasonova [et al.] // Proceedings of International Conference Image Analysis and Recognition (ICIAR'2014). — 2014. — Pp. 159–166.