

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

Факультет вычислительной математики и кибернетики

На правах рукописи



Насонов Андрей Владимирович

РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2011

Диссертационная работа выполнена на кафедре математической физики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Крылов Андрей Серджевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Кочкиков Игорь Викторович
кандидат физико-математических наук
Степанов Владимир Вадимович

Ведущая организация: Институт прикладной математики им.
М.В. Келдыша РАН

Защита состоится 2 ноября 2011 г. в 15³⁰ на заседании диссертационного совета Д 501.001.43 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет ВМК, ауд. 685.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке факультета ВМК Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ “ сентября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Захаров Евгений Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Быстрый прогресс в области компьютерной техники позволяет применять для решения задач обработки и анализа изображений всё более современные математические методы. Более того, многие достижения в области обработки и анализа изображений во многом связаны именно с применением математических методов. Математические методы, ранее возникшие и развившиеся при решении задач в различных прикладных областях, являются ценным источником для создания новых мультимедийных алгоритмов. Таковыми являются и регуляризирующие методы решения некорректных задач, которые в данной работе составляют базу построения эффективных алгоритмов компьютерного повышения разрешения изображений.

Задача повышения разрешения изображений является важной для широкого класса практических приложений, таких как обработка и анализ медицинских изображений, обработка аэрокосмических снимков, обработка данных видеонаблюдения, трансляция видеопотока низкого разрешения на современных широкоформатных дисплеях и большого ряда других задач.

Высокая производительность компьютеров в настоящее время даёт возможность в реальном времени использовать сложные итерационные методы повышения разрешения изображений, а также решать задачу суперразрешения. Суперразрешение позволяет сразу по нескольким различным изображениям низкого разрешения одного и того же объекта построить одно изображение высокого разрешения. Это позволяет достичь лучшего качества по сравнению с применением повышения разрешения каждого из изображений низкого разрешения по отдельности.

Цель работы

Целью диссертационной работы является построение и программная реализация регуляризирующих методов повышения разрешения изображений и суперразрешения, а также методов их анализа и постобработки, включающих в себя разработку метрик оценки качества обработки контуров и методов подавления артефактов, внесённых алгоритмами повышения разрешения изображения.

Научная новизна работы

- Разработаны регуляризирующие алгоритмы повышения разрешения изображений и суперразрешения.
- Созданы метрики оценки качества алгоритмов повышения разрешения.
- Предложены и алгоритмически реализованы регуляризирующие методы подавления эффекта Гиббса на изображениях и повышения резкости изображений.

Теоретическая и практическая значимость работы

- Создан программный комплекс для анализа и повышения качества изображений, повышения разрешения и суперразрешения.
- Разработанные в работе методы повышения разрешения изображений могут быть применены как составная часть комплексных алгоритмов обработки и анализа изображений.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

1. конференции «Тихоновские чтения 2011», ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова (Москва, 2011);

2. 12-й международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и её применение» DSPA (Москва, 2010) [6];
3. 8-й и 10-й международных конференциях «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (Нижний Новгород, 2008, Санкт-Петербург, 2010) [7, 8];
4. 20-й международной конференции по распознаванию образов ICPR (Стамбул, Турция, 2010) [9];
5. 15-й и 16-й международных конференциях по обработке изображений ICIP (Сан-Диего, США, 2008, Каир, Египет, 2009) [10–12];
6. 5-й международной конференции по обработке изображений и графике ICIG (Сиань, Китай, 2009) [13];
7. 16–19-й международных конференциях по компьютерной графике и зрению Графикон (Новосибирск, 2006, Москва, 2007, 2008, 2009) [14–18];
8. 9-й международной конференции по обработке сигналов ICSP (Пекин, Китай, 2008) [19];
9. 6-й Курчатовской молодёжной научной школе (Москва, 2008) [20];
10. Заседании кафедры математической физики факультета ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, 11 мая 2011 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 — в статьях журналов списка ВАК [1–5]. Список публикаций по теме диссертации приведён в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав и списка литературы. Объем работы — 110 страниц. Список литературы включает 73 наименования.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, ставятся цели диссертационного исследования.

В **первой главе** рассматриваются задачи повышения разрешения изображений и суперразрешения.

В первом разделе приводится краткий обзор существующих методов повышения разрешения изображений, включающих классы линейных и нелинейных методов. В общем случае линейные методы основаны на использовании свёртки изображения и некоторого ядра $K(x, y)$:

$$f(x_0, y_0) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} u_{i,j} K\left(\frac{x_0}{h_x} - i, \frac{y_0}{h_y} - j\right), \quad (1)$$

где $f(x, y)$ — интерполированное изображение, $u_{i,j} = u(ih_x, jh_y)$ — изображение низкого разрешения, представляющее собой сеточную функцию, заданную на прямоугольной равномерной сетке

$$\Omega_{h_x, h_y} = \{(x_i, y_j), x_i = ih_x, y_j = jh_y, i, j \in \mathbb{Z}\}.$$

Преимуществом линейных методов является их простота и вычислительная эффективность, но, в отличие от нелинейных методов, любой линейный метод имеет хотя бы один из следующих артефактов: алиасинг (ступенчатость контуров), размытие и эффект Гиббса, проявляющийся в виде ложного оконтуривания (см. рис. 1).

Среди класса нелинейных алгоритмов в диссертационной работе основную роль играют алгоритмы, представляющие задачу повышения разрешения изображений как обратную задачу для операторного урав-



Рис. 1: Примеры артефактов, возникающих при повышении разрешения изображений.

нения

$$Az = u, \quad z \in Z, u \in U, \quad (2)$$

где u — известное изображение низкого разрешения, z — искомое изображение высокого разрешения, A — оператор понижения разрешения, Z и U — пространства изображений, заданных на сетках с малым и большим шагами соответственно. Данная постановка лежит в основе созданных в работе методов повышения разрешения и суперразрешения.

Во втором разделе рассматривается математическая модель получения цифровых изображений с помощью оптических камер, на основе которой строится оператор A , ставятся задачи повышения разрешения изображений и суперразрешения как обратные некорректные задачи для задач понижения разрешения изображений (2).

Оператор понижения разрешения A для коэффициента масштабирования $s > 1$ представляется в виде:

$$A = D_s H_{\sigma_0 \sqrt{s^2 - 1}},$$

где $H_{\sigma_0 \sqrt{s^2 - 1}}$ — оператор свёртки с фильтром Гаусса (функцией нормального распределения) с радиусом (квадратным корнем из дисперсии) $\sigma_0 \sqrt{s^2 - 1}$, D_s — оператор перехода на сетку с s раз большим шагом, σ_0 — параметр, зависящий от конструкции камеры. В работе используется значение $\sigma_0 = 0,4$.

Задача суперразрешения изображений ставится как обратная задача

для системы операторных уравнений относительно z

$$A_s^k z = D_s H_{\sigma_0 \sqrt{s^2 - 1}} T_k z = u^k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

где u^k — изображения низкого разрешения, T_k — оператор движения, преобразующий z в k -ое изображение.

В третьем разделе производится построение регуляризирующих методов решения задач повышения разрешения изображений и суперразрешения (2), (3), проводится анализ выбора норм пространств U , Z и стабилизатора.

Для нахождения решения поставленных обратных задач применяется метод регуляризации А.Н.Тихонова. Особенностью задач повышения разрешения изображений и суперразрешения является допущение неединственности решения, которое не приводит к снижению субъективного качества изображений высокого разрешения. Это позволяет расширить класс используемых стабилизаторов. При этом вместо обычной сходимости используется понятие бета-сходимости. Задача регуляризации рассматривается в следующих постановках:

I. Нахождение $\inf (\|Az - u\|_U + \lambda \Psi[z])$, $\lambda > 0$.

Ia. Нахождение $\inf (\|Az - u\|_U^2 + \lambda \Psi[z])$, $\lambda > 0$.

II. Нахождение $\inf \Psi[z]$ для $\|Az - u\|_U \leq \delta$, $\delta > 0$.

III. Нахождение $\inf \|Az - u\|_U$ для $\Psi[z] \leq C$, $C > 0$.

В диссертационной работе регуляризирующий метод строится в постановке II. Далее определяются условия, при которых постановки I, Ia, II и III являются эквивалентными. Это позволяет выбирать наиболее удобную с вычислительной точки зрения постановку для решаемых практических задач.

Рассматриваются следующие нормы пространств:

$$\|z\|_1 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} |z_{i,j}|,$$

$$\|z\|_2^2 = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{j=0}^{N_y} |z_{i,j}|^2$$

и следующие стабилизаторы:

$$\Psi[z] = \|\Delta z\|_2^2,$$

$$\Psi[z] = \|z\|_{TV} = h \sum_{i,j} (|z_{i+1,j} - z_{i,j}| + |z_{i,j+1} - z_{i,j}|),$$

$$\Psi[z] = \|z\|_{BTV} = h \sum_{s,t=-p}^p \left(\gamma_{s,t} \sum_{i,j} |z_{i+s,j+t} - z_{i,j}| \right),$$

где $\gamma_{s,t} = 0, 8^{|s|+|t|}$, p — параметр.

Квадратичные стабилизаторы, такие как $\|\Delta z\|_2^2$, являются наиболее часто используемыми в методах регуляризации. Однако, при выборе квадратичного стабилизатора и квадратичной нормы невязки метод становится линейным. Это означает, что результату повышения разрешения изображений присущи артефакты линейных методов, а именно: при больших значениях параметра регуляризации λ возникает эффект размытия, а при малых λ появляется эффект Гиббса, проявляющийся в виде ореолов возле контуров объектов.

Функционал $\|z\|_{TV}$ является аппроксимацией функционала полной вариации в дискретном случае. В двухмерном случае значение полной вариации равно суммарной длине линий уровня на изображении. При повышении разрешения изображений предполагается, что не появляются и не исчезают контуры, а, значит, и не меняется суммарная длина линий уровня. Эта взаимосвязь позволяет использовать функционал полной вариации в качестве стабилизатора для сохранения структуры изображения.

В дискретном случае использование $\|z\|_{TV}$ даёт лишь приближённую информацию о полной вариации изображения. Для повышения точности

используется функционал билатеральной полной вариации $\|z\|_{BTV}$. Параметр p ограничивает количество направлений. Чем больше значение p , тем выше точность метода, но и выше его вычислительная сложность.

Экспериментальный анализ показал, что при коэффициентах масштабирования $s = 2, 3, 4$ эффективно использование стабилизатора $\|z\|_{BTV}$ при $p = 1$ в комбинации с нормой $\|z\|_2^2$.

В этом разделе также предложены регуляризирующий метод нахождения соответствий между изображениями в задаче суперразрешения и итерационный метод решения задачи суперразрешения.

Вторая глава посвящена разработке методов анализа и постобработки для задачи повышения разрешения изображений.

В первом разделе второй главы описывается алгоритм оценки качества изображений, основанный на анализе характерных артефактов алгоритмов повышения разрешения изображений — размытия и эффекта Гиббса. Предлагается алгоритм нахождения областей, соответствующих этим артефактам, основанный на использовании методов математической морфологии. Алгоритм находит базовые контуры на изображении — контуры, которые сохраняются до определённого уровня деградации качества изображения, а затем выделяет окрестности, прилегающие к базовым контурам. Предлагаемые метрики оценки качества изображений в областях базовых границ проиллюстрированы на примере алгоритма комбинирования результатов двух различных алгоритмов повышения разрешения изображений.

Во втором разделе приводится алгоритм оценки наличия эффекта Гиббса на изображениях. Алгоритм основан на анализе значения функционала полной вариации для профилей базовых контуров изображений на разных масштабах в пространстве переменных разрешений. Для подавления эффекта Гиббса предложен регуляризирующий метод в поста-

новке III со стабилизатором в виде функционала полной вариации:

$$z_C = \arg \min_{z: \|z\|_{TV} \leq C} \|z - z_0\|_2,$$

где z_0 — изображение с эффектом Гиббса, C — требуемое значение функционала полной вариации. В случае подавления эффекта Гиббса после повышения разрешения изображений, значение параметра C берётся равным значению полной вариации изображения низкого разрешения.

В третьем разделе рассматривается задача повышения резкости изображений. Для моделирования размытия изображений используется фильтр Гаусса. Используется регуляризирующий метод

$$z_C = \arg \min_{z: \|z\|_{TV} \leq C} \|H_\sigma z - u\|_2^2. \quad (4)$$

Предложена модификация метода для случая зашумлённых изображений, заключающаяся в разделении изображений на структурную и шумовую компоненты и последующем повышении резкости с помощью (4) только структурной компоненты.

На рис. 2 приведены результаты работы разработанных алгоритма повышения разрешения изображений и алгоритма подавления эффекта Гиббса после повышения разрешения.

Третья глава посвящена описанию разработанного программного комплекса и реализации используемых в работе методов минимизации регуляризирующих функционалов. Для минимизации используемых в работе недифференцируемых выпуклых функционалов используется субградиентный метод:

$$z^{(k+1)} = z^{(k)} - \alpha_k g^{(k)},$$

где $g^{(k)}$ — один из субградиентов функционала $J(z) = \|Az - u\|_2^2 + \lambda \Psi[z]$ в точке $z = z^{(k)}$.

Проведённый анализ показал, что для повышения разрешения изображения достаточно эффективно использовать следующий выбор шага:

$$\alpha_k = \frac{N \gamma_k}{\|g^{(k)}\|_2}, \quad \gamma_k = \gamma_0 q^k, \quad (5)$$



а) Изображение низкого разрешения



б) Увеличение изображения в 2 раза с большим параметром регуляризации, не приводящим к появлению эффекта Гиббса



в) Увеличение изображения в 2 раза с малым параметром регуляризации, приводящим к появлению эффекта Гиббса



г) Результат применения алгоритма подавления эффекта Гиббса к изображению в)

Рис. 2: Пример работы разработанных алгоритма повышения разрешения изображений и алгоритма подавления эффекта Гиббса после повышения разрешения.

где N — число пикселей изображения. Основным параметром здесь является q , отвечающий за скорость уменьшения длины шага. Параметр γ_0 задаёт величину шага для первой итерации.

В данной главе также проведён анализ метода практического выбора

значения параметра регуляризации для задачи повышения разрешения изображений.

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

Основные результаты

1. Разработаны и обоснованы регуляризирующие алгоритмы повышения разрешения изображений и суперразрешения. Созданы метрики оценки качества алгоритмов повышения разрешения.
2. Предложены и алгоритмически реализованы регуляризирующие методы подавления эффекта Гиббса на изображениях и повышения резкости изображений.
3. Создан программный комплекс для анализа и повышения качества изображений, повышения разрешения и суперразрешения.

Список литературы

- [1] *Насонов А. В., Крылов А. С., Урмаев О. С.* Применение метода суперразрешения для биометрических задач распознавания лиц в видеопотоке // *Системы высокой доступности*. — 2009. — Т. 1. — С. 26–34.
- [2] *Krylov A. S., Nasonov A. V., Ushmaev O. S.* Video super-resolution with fast deconvolution // *Pattern Recognition and Image Analysis*. — 2009. — Vol. 19, no. 3. — Pp. 497–500.
- [3] *Насонов А. В., Крылов А. С., Урмаев О. С.* Развитие методов повышения качества изображений лиц в видеопотоке // *Информатика и её применения*. — 2009. — Т. 3, № 1. — С. 19–28.

- [4] *Nasonov A. V., Krylov A. S.* Finding areas of typical artifacts of image enhancement methods // *Pattern Recognition and Image Analysis*. — 2011. — Vol. 21, no. 2. — Pp. 316–318.
- [5] *Krylov A. S., Nasonov A. V.* Edge-directed image interpolation using color gradient information // *Lecture Notes in Computer Science*. — 2011. — Vol. 6979. — Pp. 40–49.
- [6] *Насонов А. В., Крылов А. С.* Быстрое суперразрешение изображений с использованием взвешенной медианной фильтрации // *Труды 12-й международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA'2010)*. — 2010. — Т. 2. — С. 101–104.
- [7] *Krylov A. S., Nasonov A. V., Ushmaev O. S.* Image super-resolution using fast deconvolution // *Proceedings of 9th Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies, Nizhni Novgorod*. — 2008. — Vol. 1, no. 2. — Pp. 362–364.
- [8] *Nasonov A. V., Krylov A. S.* Basic edges metrics for image deblurring // *Proceedings of 10th Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA2010)*. — 2010. — Vol. 1. — Pp. 243–246.
- [9] *Nasonov A. V., Krylov A. S.* Fast super-resolution using weighted median filtering // *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition (ICPR'2010)*. — 2010. — Pp. 2230–2233.
- [10] *Krylov A. S., Lukin A. S., Nasonov A. V.* Edge-preserving nonlinear iterative image resampling method // *Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP'09)*. — 2009. — Pp. 385–388.
- [11] *Nasonov A. V., Krylov A. S.* Scale-space method of image ringing estimation // *Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP'09)*. — 2009. — Pp. 2794–2797.

- [12] Krylov A. S., Nasonov A. V. Adaptive total variation deringing method for image interpolation // *Proceedings of International Conference on Image Processing (ICIP'08)*. — 2008. — Pp. 2608–2611.
- [13] Krylov A. S., Nasonov A. V. Adaptive image deblurring with ringing control // *Fifth International Conference on Image and Graphics (ICIG '09)*. — 2009. — Pp. 72–75.
- [14] Lukin A. S., Krylov A. S., Nasonov A. V. Image interpolation by super-resolution // *Proceedings of GraphiCon'2006*. — 2006. — Pp. 239–242.
- [15] Nasonov A. V., Krylov A. S., Lukin A. S. Post-processing by total variation quasi-solution method for image interpolation // *Proceedings of GraphiCon'2007*. — 2007. — Pp. 178–181.
- [16] Krylov A. S., Nasonov A. V., Sorokin D. V. Face image super-resolution from video data with non-uniform illumination // *Proceedings of GraphiCon'2008*. — 2008. — Pp. 150–155.
- [17] Nasonov A. V., Krylov A. S. Adaptive image deringing // *Proceedings of GraphiCon'2009*. — 2009. — Pp. 151–154.
- [18] Krylov A. S., Nasonov A. V., Chernomorets A. A. Combined linear resampling method with ringing control // *Proceedings of GraphiCon'2009*. — 2009. — Pp. 163–165.
- [19] Krylov A. S., Nasonov A. V. Fast super-resolution from video data using optical flow estimation // *Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP'08), Beijing*. — Pp. 853–856.
- [20] Насонов А. В. Программное повышение разрешения и подавление эффекта Гиббса на изображениях // *Сборник аннотаций работ 6-й Курчатовской молодёжной научной школы*. — 2008. — С. 153.