

# ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

## ПОСТРОЕНИЕ КИХ-ФИЛЬТРОВ В ЗАДАННОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ КЛАССЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ДЕФОКУСИРОВКИ

В.А. Фурсов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

### Аннотация

Рассматривается технология восстановления изображений, подвергшихся искажениям типа дефокусировки с использованием КИХ-фильтров, получаемых путем идентификации параметров модели импульсного отклика по прецедентам. Модель импульсного отклика задается в классе одномерных функций, являющихся аппроксимацией заданного частотного отклика фильтра в радиальном направлении. Отсчеты двумерного импульсного отклика определяются с учетом свойства радиальной симметрии искажений путем дискретизации этой функции и нормализации отсчетов. Класс аппроксимирующих функций задается так, чтобы обеспечивались желаемые свойства частотного отклика для устранения дефокусировки: усиление низких и подавление высоких частот. Важным достоинством метода являются высокое качество восстановления и быстрота настройки фильтра, т.к. аппроксимирующая функция соответствует заданному частотному отклику и определяется малым числом настраиваемых параметров. Приводятся примеры реализации, иллюстрирующие возможность достижения более высокого качества, по сравнению с фильтром Винера, размещенным в открытой библиотеке обработки изображений OpenCV.

**Ключевые слова:** КИХ-фильтр, импульсный отклик, частотный отклик, обработка изображений.

**Цитирование:** Фурсов, В.А. Построение КИХ-фильтров в заданном параметрическом классе частотных характеристик для коррекции дефокусировки / В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 6. – С. 878-886. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-878-886.

### Введение

Проблема восстановления изображений с использованием линейных фильтров изучается более тридцати лет [1] и тем не менее остается актуальной [2, 3]. Простейшим способом восстановления искаженных изображений является обработка наблюдаемого изображения инверсным фильтром [1, 4]. Задача построения инверсного фильтра для восстановления изображений сводится к нахождению некоторого приближения к обратному оператору. При этом основная проблема состоит в том, что соответствующая передаточная функция может иметь полюса, близкие к нулю.

В связи с этой проблемой общепринятым является мнение, что инверсная фильтрация обладает низкой помехоустойчивостью, поскольку этот метод не учитывает зашумленность наблюдаемого изображения. Однако этот недостаток преодолевается, если при этом используется принцип идентификации по прецедентам [5]. Этот подход заключается в том, что само преобразование и его параметры определяются на основании анализа входных и выходных сигналов или изображений [6]. При этом, поскольку предъявляемый для идентификации образец искаженного изображения содержит реальные шумы, в результате идентификации подбираются наилучшие, в смысле заданного критерия, параметры фильтра с учетом реальных помех [7].

В рамках указанного идентификационного подхода ключевым является вопрос задания подходящей модели фильтра и определения параметров этой модели [8].

Наиболее широко при решении задач коррекции искаженных изображений используются КИХ-фильтры. Это связано с их известными преимуществами: устойчивостью и простотой реализации. В частности, в работе [9] обсуждаются преимущества КИХ-фильтров перед БИХ-фильтрами, а также рассматриваются наиболее популярные схемы их построения с использованием оконных функций, фильтра Винера [10] и др.

Методы построения фильтра Винера, а также фильтров, синтезируемых с использованием оконных функций, имеют прочную теоретическую основу, однако практическая реализация этих фильтров часто оказывается недостаточно эффективной. Дело в том, что они не всегда достаточно полно учитывают специфические особенности моделей искажений. В частности, оконные функции обычно ориентированы на широкий спектр приложений и в конкретных ситуациях не всегда обеспечивают требуемое качество восстановления изображений.

Альтернативный подход состоит в использовании параметрического оценивания конкретной математической модели искажающей системы с малым числом неизвестных параметров [11, 12]. Методы и алгоритмы параметрической идентификации моделей искажений изображений по малому числу наблюдений исследовались автором в предшествующих работах [13, 14]. В частности, предложена технология параметрической идентификации по прецедентам, задаваемым в виде фрагментов тестовых (неискаженного и реального искаженного) изображений [15].

В рамках этого подхода при решении задачи идентификации импульсного отклика КИХ-фильтра размерность задачи, равная числу отсчетов импульсного отклика, при интенсивных искажениях велика. Это приводит к ухудшению обусловленности задачи и снижению надежности идентификации [16]. Попытка улучшения обусловленности применением более грубой сетки отсчетов приводит к потере качества. Применение моделей БИХ-фильтров снимает проблему размерности, однако при этом возникает серьезная проблема обеспечения устойчивости [13].

В настоящей статье предлагается технология синтеза КИХ-фильтра, в которой вместо определения самих отсчетов импульсного отклика осуществляется идентификация параметров непрерывной функции, аппроксимирующей импульсный отклик. При этом зависящее от небольшого числа параметров параметрическое семейство аппроксимирующих функций задается с учетом желаемых частотных характеристик КИХ-фильтров, предназначенных для коррекции искажений (в настоящей работе дефокусировки).

Указанный подход позволяет, насколько возможно, точно учитывать особенности модели искажений. В частности, известно, что искажения типа дефокусировки проявляются в ослаблении высоких частот, поэтому обратный оператор, вообще говоря, должен усиливать вклад высоких частот. Однако это возможно лишь до определенного предела, поскольку при этом усиливается также влияние помех. Поэтому параметрическая модель инверсного тракта должна обеспечивать компромисс между качеством компенсации дефокусировки и усилением помех. Исследованию одной такой модели и посвящена настоящая работа.

Работа организована следующим образом. В первом параграфе вводится необходимый формализм. Второй параграф посвящен построению модели, описывающей непрерывную функцию, аппроксимирующую импульсный отклик для заданной функции частотного отклика. В следующем, третьем, параграфе с использованием полученной непрерывной аппроксимации строится технология реализации дискретного КИХ-фильтра. В заключительном, четвертом, параграфе приводятся результаты экспериментов, подтверждающие возможность достижения высокого качества восстановления изображений при крайне малых затратах времени на определение параметров фильтра.

### 1. Постановка задачи

Будем строить КИХ-фильтр с чисто вещественным частотным откликом (с нулевой фазой) [1, 4]. Следовательно, начало координат должно быть центром симметрии опорной области. Указанное допущение мотивируется тем, что это достаточно распространенный на практике случай, вместе с тем это позволит нам достаточно наглядно продемонстрировать основные идеи предлагаемой технологии.

В общем случае, если фильтр обладает опорной областью  $D$ :

$$\{D(n_1, n_2) : 0 \leq n_1 < N_1, 0 \leq n_2 < N_2\}, \quad (1)$$

то отсчеты восстановленного изображения  $y(n_1, n_2)$  можно определить по отсчетам  $x(n_1, n_2) \in D$  искаженного изображения как [17]

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} h(k_1, k_2) x(n_1 - k_1, n_2 - k_2), \quad (2)$$

где  $h(k_1, k_2)$  – двумерная импульсная характеристика.

Ограничимся случаем радиальной симметрии искажений, характерным для дефокусировки. Поскольку при радиальной симметрии искажений отсчеты, находящиеся на одинаковых расстояниях от центра опорной области, имеют одинаковые искажения, удобно задать опорную область в виде квадрата  $N \times N$  с центром в точке  $k_1 = 0, k_2 = 0$  так, что  $N$  – нечетно и  $N_1 = N_2 = N$ . Пусть при некотором положении опорной области центральный отсчет опорной области  $x(0, 0)$  находится в точке изображения с координатами  $n_1, n_2$  (см. рис. 1). Тогда соотношение для вычисления соответствующего отсчета восстановленного изображения можно представить в виде:

$$y(n_1, n_2) = \sum_{\forall r_i} h(r_i) x(r_i), \quad (3)$$

где

$$x(r_i) = \frac{1}{N(r_i)} \sum_{j=1}^{N(r_i)} x_j(r_i),$$

$h(r_i)$  – одномерная импульсная характеристика, зависящая от радиуса  $r_i$ , а  $N(r_i)$  – число отсчетов, «попавших» на окружность радиуса  $r_i$ . Схема формирования центрального отсчета для одного положения опорной области с размерами  $7 \times 7$  показана на рис. 1.

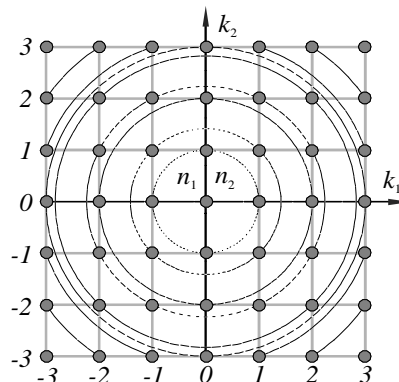


Рис. 1. Пример опорной области  $7 \times 7$

В рамках модели (3) задача оценивания двумерной передаточной функции фильтра сводится к одномерной. При этом схема построения двумерного КИХ-фильтра на этапе обработки очевидна. Например, для ближайшей к отсчету  $x(n_1, n_2)$  окружности с радиусом  $r_1$ , равным одному межпиксельному расстоянию, импульсный отклик  $h(r_1)$  будет одинаковым для четырех отсчетов изображения в окрестности точки с координатами  $n_1, n_2$ :  $x(n_1, n_2 + 1), x(n_1, n_2 - 1), x(n_1 + 1, n_2), x(n_1 - 1, n_2)$ .

С учетом сказанного ставится задача формирования модели импульсного отклика в классе одномерных функций, являющихся аппроксимацией заданного частотного отклика фильтра в радиальном направлении. При этом класс аппроксимирующих функций

задается так, чтобы обеспечить желаемые свойства частотного отклика для устранения дефокусировки (усиление низких и подавление высоких частот). При этом для реализации собственно КИХ-фильтра отсчеты двумерного импульсного отклика должны определяться с учетом свойства радиальной симметрии искажений путем дискретизации этой функции и нормализации отсчетов.

**2. Построение аппроксимирующей функции**

В соответствии с приведенной выше формулировкой задачи вначале построим функцию, аппроксимирующую импульсный отклик КИХ-фильтра таким образом, чтобы его частотная характеристика обеспечивала «подъем» низких частот и подавление высоких частот в области действия шума. Достаточно простой моделью частотной характеристики, обладающей такими свойствами, являются соотношения вида:

$$S(\omega) = \begin{cases} a\omega^2, & \text{при } |\omega| \leq \omega^*, \\ e^{-c|\omega|}, & \text{при } |\omega| > \omega^*, \end{cases} \quad (4)$$

$$S(\omega^*) = a\omega^{*2} = e^{-c\omega^*}. \quad (5)$$

Предложенная функция состоит из отрезков параболы в диапазоне частот  $|\omega| \leq \omega^*$  и убывающей экспоненты – при  $|\omega| > \omega^*$ . Мы требуем также, чтобы ординаты этих отрезков функций совпадали при некоторой частоте  $\omega = \omega^*$ . Участок параболы обеспечивает «подъем» низких частот, а участок экспоненты – подавление высоких частот, содержащих помехи. График указанной составной функции для положительных частот приведен на рис. 2.

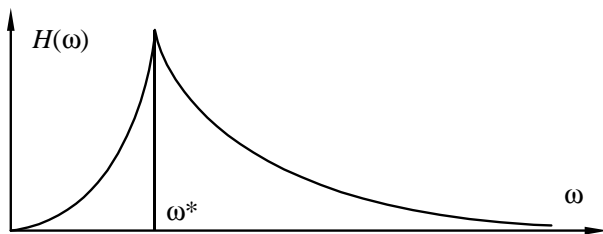


Рис. 2. Типичный вид графика спектра фильтра

Предположение о радиальной симметрии искажений позволяет нам рассматривать двумерную частотную характеристику как результат «вращения» одномерной частотной характеристики, заданной в радиальном направлении на интервале  $[0, \infty)$ . Таким образом, мы полагаем спектр (4) одномерным, притом только для положительных частот  $\omega$ . Соответствующий этой спектральной характеристике импульсный отклик зависит от пространственного параметра  $r$ , являющегося расстоянием от центра опорной области. При этих предположениях соотношение для импульсного отклика одномерного КИХ-фильтра описывается следующим обратным преобразованием Фурье:

$$h(r) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ \int_0^{\omega^*} a\omega^2 e^{j\omega r} d\omega + \int_{\omega^*}^{\infty} e^{-c\omega} e^{j\omega r} d\omega \right]. \quad (6)$$

Неопределенные интегралы, соответствующие первому и второму слагаемому в квадратных скобках правой части в (6), имеют вид:

$$\int a\omega^2 e^{j\omega r} d\omega = a \frac{e^{j\omega r}}{jr} \left\{ \omega^2 - \frac{2\omega}{jr} + \frac{2}{(jr)^2} \right\}, \quad (7)$$

$$\int e^{-c\omega} e^{j\omega r} d\omega = -\frac{e^{-c\omega} e^{j\omega r}}{jr - c}. \quad (8)$$

Подставляя полученные интегралы (7), (8) в (6) с учетом указанных в (6) пределов интегрирования, получаем

$$h(r) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left\{ a \left[ \frac{\omega^{*2}}{jr} e^{j\omega^* r} - \frac{2\omega}{(jr)^2} e^{j\omega^* r} - \frac{2}{jr^3} e^{j\omega^* r} + \frac{2}{r^2} \right] + \left[ \frac{1}{c - jr} e^{-c\omega^*} e^{j\omega^* r} \right] \right\}. \quad (9)$$

После выделения действительной части получаем:

$$h(r) = \frac{1}{\pi} \left\{ a \left[ \frac{\omega^{*2} \sin \omega^* r}{r} + \frac{2\omega^* \cos \omega^* r}{r^2} - \frac{2 \sin \omega^* r}{r^3} \right] + \left[ \frac{e^{-c\omega^*}}{c^2 + r^2} (c \cos(\omega^* r) - r \sin(\omega^* r)) \right] \right\}. \quad (10)$$

Полученное семейство функций, аппроксимирующих импульсный отклик  $h(r)$ , является функцией  $r$  и зависит от трех параметров:  $a$ ,  $c$ ,  $\omega^*$ . Мы можем исключить один параметр, например  $a$ , выполнив с учетом условия (5) замену:

$$a = e^{-c\omega^*} / \omega^{*2}. \quad (11)$$

После подстановки (11) в (10) и соответствующих преобразований получаем

$$h(r) = \frac{e^{-c\omega^*}}{\pi} \left[ \frac{\sin \omega^* r}{r} + \frac{2 \cos \omega^* r}{r^2 \omega^*} - \frac{2 \sin \omega^* r}{r^3 \omega^{*2}} + \frac{(c \cos(\omega^* r) - r \sin(\omega^* r))}{c^2 + r^2} \right]. \quad (12)$$

Из (12) видно, что аппроксимация импульсного отклика  $h(r)$  сводится к настройке двух параметров:  $\omega^*$  и  $c$ . Параметр  $\omega^*$  является абсциссой максимального значения частотной характеристики КИХ-фильтра и «отвечает» за качество коррекции дефокусировки. Параметр  $c$  характеризует степень присутствия высоких частот в восстановленном изображении. Если в качестве критерия настройки параметра  $c$  используется качество восстановления, то увеличение интенсивности помех на искаженном изображении будет сопровождаться увеличением этого параметра, обеспечивающего снижение влияния помех в высокочастотной области. Соответствующие эксперименты будут приведены в параграфе 3.

Все отсчеты импульсного отклика получаются путем дискретизации непрерывной функции (12). При этом для каждого отсчета из заданной опорной обла-

сти аргумент  $r$  принимается равным радиусу окружности, на которой находится этот отсчет.

Отдельного обсуждения заслуживает вопрос определения центрального отсчета опорной области при  $r=0$ . Нетрудно заметить, что правая часть в (12) содержит слагаемые, в которых аргумент  $r$  находится в знаменателе, либо имеет место неопределенность типа ноль на ноль. Поэтому центральный отсчет определяется как предел  $h(r)$  при  $r \rightarrow 0$ :

$$h(0) = \lim_{r \rightarrow 0} h(r) = \frac{e^{-c\omega^*}}{\pi} \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{\sin \omega^* r}{r} + \frac{2 \cos \omega^* r}{r^2 \omega} - \frac{2 \sin \omega^* r}{r^3 \omega^2} \right) + \frac{e^{-c\omega^*}}{\pi c} = \frac{\omega^* c + 3}{3\pi} e^{-c\omega^*}. \quad (13)$$

В следующем параграфе с использованием полученной аппроксимирующей функции (12) строится общая схема технологии идентификации КИХ-фильтра и обработки изображений.

### 3. Описание технологии

Предлагаемая итерационная схема синтеза КИХ-фильтра и коррекции искажений типа дефокусировки, основанная на соотношении (12), приведена на рис. 3. Далее приводится детальное описание процедур и правил принятия решений в блоках (этапах) этой схемы.

Реализация блока 1 этой схемы, по существу, уже рассмотрена в предыдущем параграфе. В данном случае результатом является задание непрерывной аппроксимирующей функции  $h(\omega^*, r)$ , которая описывается соотношениями (12), (13). Вводя этот блок в технологию, мы имели в виду возможность формирования других параметрических классов функций, соответствующих отличающимся от заданной в (4), (5) частотным характеристикам.

В блоке 2 задаются тестовые изображения, полученные при тех же или максимально близких условиях регистрации, которые реализуются при формировании реальных изображений. Бывает весьма трудно получить тестовые изображения в ситуации, когда интенсивность искажений невелика. В этом случае ошибки совмещения искаженного и неискаженного изображений могут быть сопоставимы с ошибками модели. Поэтому более высокая точность идентификации модели фильтра обычно достигается при формировании тестового «неискаженного» изображения путем «ретуширования» малых фрагментов искаженного изображения с использованием априорной информации о форме регистрируемых объектов [13, 15].

Начальная оценка  $\hat{\omega}^*$  на первом шаге в блоке 3 задается равной минимальному граничному значению пространственной частоты из диапазона коррекции.

Если такая информация отсутствует,  $\hat{\omega}^*$  можно задать равной нулю. Это будет соответствовать отсутствию интервала «подъема» низких частот. Формирование импульсных откликов (блок 4) состоит в задании дискретных значений функции (12) во всех точках опорной области  $D(n_1, n_2)$ . После задания дис-

кретных значений отсчетов импульсного отклика, осуществляется их нормировка:

$$\sum_{\forall r_i} \sum_{k_2, k_1 \in D}^{N_1-1, N_2-1} h(r_i, n_1 - k_1(r_i), n_2 - k_2(r_i)) = 1, \quad (14)$$

обеспечивающая сохранение среднего уровня яркости обработанного изображения.

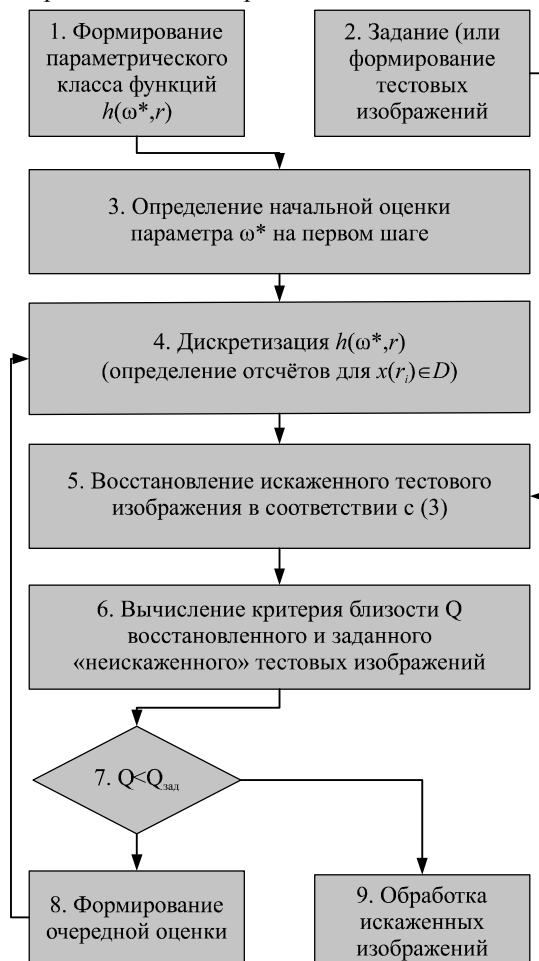


Рис. 3. Схема этапов технологии

С использованием полученного импульсного отклика обрабатывается искаженное тестовое изображение (блок 5). По полученному восстановленному и исходному неискаженному тестовому изображениям в блоке 6 вычисляется значение заданного критерия близости  $Q$ . Далее с использованием значений критерия на текущем и предшествующем (или нескольких предшествующих) шагах формируются новые оценки параметров  $\hat{\omega}^*$  и  $c$ .

В схеме специально не указывается применяемый критерий и способ корректировки параметров  $\hat{\omega}^*$  и  $c$ . Дело в том, что по указанной схеме могут быть реализованы различные алгоритмы как случайного, так и регулярного поиска.

Подчеркнем, что, хотя аппроксимирующая импульсный отклик функция непрерывна, при обработке изображений и вычислении критерия мы имеем дело только с отсчетами в узлах решетки, образованной пикселями ПЗС-матрицы в опорной области. Поэтому

даже если расстояние между окружностями в радиальном направлении меньше одного межпиксельного расстояния, между самими отсчетами, расположенными на этих окружностях, расстояния не могут быть менее одного межпиксельного. Например, отсчеты  $x(0, 2)$ ,  $x(1, 2)$ , находящиеся на очень близких (третьей и четвертой, считая от центра) окружностях, оказываются на одном межпиксельном расстоянии.

Таким образом, группируя отсчеты, принадлежащие отдельным, в т.ч. близким, окружностям, мы формируем импульсный отклик КИХ-фильтра для всех отсчетов из опорной области без пропусков. Ниже приводятся результаты экспериментов, реализующих описанную технологию.

#### 4. Результаты экспериментов

Настройка параметров  $\hat{\omega}^*$ ,  $c$  фильтра осуществлялась с использованием тестового изображения «Мира» и изображения «Лена», приведенных на рис. 4а, б. Искажения вносились путем моделирования фильтра Гаусса нижних частот для двух вариантов  $\sigma$ , соответствующих разной степени размытия:  $\sigma=3$  и  $\sigma=5$ . На рис. 5а, б приведены те же изображения после внесения искажений с указанными параметрами размытия. Оценка качества восстановления этих изображений осуществлялась с использованием показателя PSNR.

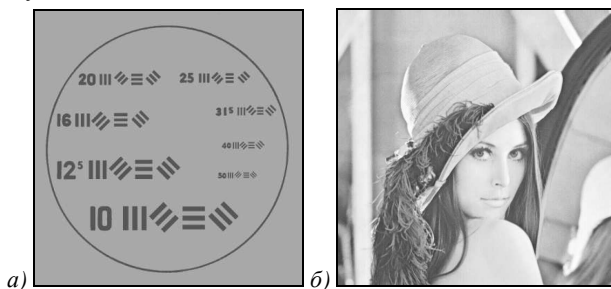


Рис. 4. Исходные неискаженные изображения: а) «Мира»; б) «Лена»

По исходному и искаженному тестовым изображениям решалась задача оценки параметров  $\hat{\omega}^*$ ,  $c$  фильтра в соответствии с описанной выше технологией. Первый эксперимент состоял в исследовании поведения оценок и связи размеров опорной области с параметрами фильтра и качеством восстановления при отсутствии на искаженном изображении шума. Результаты приведены в табл. 1, 2.

Из таблиц видно, что все характеристики зависят от размеров выбранной опорной области. При этом оценки  $\hat{\omega}^*$  параметра  $\omega^*$  обнаруживают высокую стабильность, независимо от типа изображения, в то же время наблюдается некоторый разброс оценок  $\hat{c}$  параметра  $c$ .

Дополнительные исследования показали, что вариации оценок параметра  $\hat{c}$  при том же значении оценки параметра  $\hat{\omega}^*$  даже в более широком диапазоне слабо влияют на характеристику качества PSNR. Однако сам критерий качества, как и следовало ожидать, зависит от типа изображения. В частности, на изображении «Мира» ( $\sigma=5$ ) наибольшее значение PSNR достигается при  $N=3$ , а для изображения «Лена» – при  $N=5$ . Объясняет-

ся это существенным отличием изображений: «Мира» представляется лишь в виде двух градаций яркости.



Рис. 5. Изображения «Лена»: искаженные с размытием а)  $\sigma=3$ ; б)  $\sigma=5$ ; в) обработанные при  $N=3$ ; з)  $N=5$

Табл. 1. Результаты на изображении «Мира» при отсутствии шумов

N	$\sigma=3$			$\sigma=5$		
	PSNR	$\hat{\omega}^*$	$\hat{c}$	PSNR	$\hat{\omega}^*$	$\hat{c}$
3	<b>28,45</b>	1,75	7,80	<b>25,58</b>	1,75	7,40
5	28,22	0,95	7,10	25,53	1,00	9,55
7	27,88	0,65	8,80	25,43	0,65	7,55
9	27,47	0,45	7,15	25,31	0,50	9,80
11	27,02	0,35	7,75	25,18	0,35	6,65
13	25,70	0,35	7,25	25,03	0,30	8,60

Табл. 2. Результаты на изображении «Лена» при отсутствии шумов

N	$\sigma=3$			$\sigma=5$		
	PSNR	$\hat{\omega}^*$	$c$	PSNR	$\hat{\omega}^*$	$c$
3	<b>30,41</b>	1,75	7,95	27,04	1,75	7,55
5	30,14	0,95	7,35	<b>27,18</b>	1,00	9,80
7	29,76	0,65	9,35	26,90	0,65	8,00
9	29,31	0,45	7,65	26,27	0,50	9,95
11	28,82	0,35	8,40	26,05	0,35	7,10
13	28,29	0,30	11,3	26,03	0,30	9,10

Кроме прочего, полученные результаты показывают, что для настройки параметров восстанавливающего фильтра целесообразно использовать изображения, пространственный спектр которых близок к спектрам изображений, которые реально предполагается обрабатывать. На рис. 6в, з приведены изображения, обработанные фильтрами, параметры которых соответствуют максимальным значениям PSNR: **30,41** (для  $\sigma=3$ ) и **27,18** (для  $\sigma=5$ ) в табл. 2.

Следующий эксперимент состоял в исследовании связи параметров фильтров с интенсивностью помех. Для экспериментов использовались те же изображения – «Мира» и «Лена».

Эти изображения подвергались искажениям с параметром размытия  $\sigma=3$ . Затем на эти изображения «накладывался» шум в диапазоне от 20 до 50 дБ с шагом

5 дБ. Эксперименты ставились для различных значений опорной области фильтра. Полученные в этих экспериментах значения PSNR для изображения «Мира» сведены в табл. 3, а для изображения «Лена» – в табл. 4.

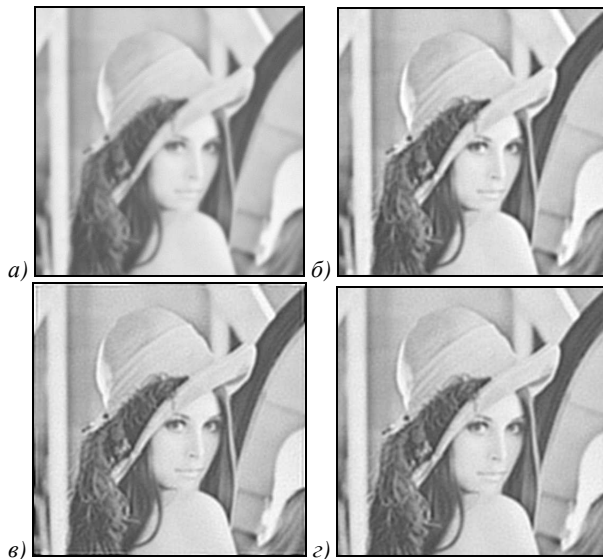


Рис. 6. Изображения «Лена»: а) искаженное ( $\sigma=3$ ) и зашумленное ( $SNR=35$ ); б) обработанное при  $N=9$ ; в) обработанное фильтром Винера; г) то же с 10 удаленными с каждой стороны строками и столбцами

Табл. 3. PSNR с шумами на изображении «Мира»

SNR (дБ)	Размер опорной области $N$					
	3	5	7	9	11	13
20.0	24,83	24,99	25,00	25,12	25,28	<b>25,36</b>
25.0	25,33	25,34	25,66	26,15	<b>26,28</b>	26,21
30.0	25,50	25,74	26,55	<b>26,92</b>	26,75	26,35
35.0	25,60	26,38	27,29	<b>27,26</b>	26,93	25,51
40.0	25,72	27,16	<b>27,65</b>	27,40	26,99	26,49
45.0	26,04	27,77	<b>27,80</b>	27,45	27,01	26,50
50.0	26,70	<b>28,06</b>	27,86	27,47	27,01	26,50

Табл. 4. PSNR с шумами на изображении «Лена»

SNR (дБ)	Размер опорной области $N$					
	3	5	7	9	11	13
20.0	25,82	26,17	26,11	26,34	26,60	<b>26,66</b>
25.0	26,60	26,63	25,99	27,62	<b>27,85</b>	27,66
30.0	26,89	27,11	28,07	<b>28,58</b>	28,47	28,06
35.0	27,04	27,91	29,01	<b>29,06</b>	28,70	26,87
40.0	27,19	28,80	<b>29,44</b>	29,02	28,77	27,10
45.0	27,53	29,55	<b>29,65</b>	29,27	28,81	27,18
50.0	28,27	<b>29,92</b>	29,71	29,29	28,81	27,21

Из таблиц видно, что в отличие от результатов, приведенных в табл. 1 и 2, наибольшие значения PSNR смещаются в сторону увеличения размерности опорных областей. Притом наиболее сильно при увеличении интенсивности помех. Вместе с тем, как нетрудно заметить, размеры опорных областей, соответствующие максимальным значениям PSNR для разных изображений, достигаются при одинаковых значениях SNR. Таким образом, параметры фильтров можно настраивать на различных типах изображений. Для обоснованного выбора параметров фильтра существенным фактором является лишь совпадение моделей искажений и шума.

В табл. 5 приведены также оценки параметров  $\hat{\omega}^*$  и  $\hat{c}$ , полученные при различных значениях SNR и различных размерах опорных областей, соответствующих максимальным значениям PSNR (в табл. 3 и 4 эти значения выделены жирным шрифтом). Отметим, что оценки  $\hat{\omega}^*$  параметра  $\hat{\omega}^*$  при одинаковых  $N$  совпадают с теми, которые получены для незашумленных изображений (см. табл. 1 и 2).

Табл. 5. Результаты с шумами на изображении

SNR (дБ)	Изображение «Мира»			Изображение «Лена»		
	$N$	$\hat{\omega}^*$	$c$	$N$	$\hat{\omega}^*$	$c$
20.0	13	0,35	9,50	13	0,35	9,50
25.0	11	0,35	8,25	11	0,35	9,00
30.0	9	0,45	7,45	9	0,45	8,95
35.0	9	0,45	7,20	9	0,45	7,75
40.0	7	0,65	8,90	7	0,65	9,60
45.0	7	0,65	8,80	7	0,65	9,45
50.0	5	0,95	7,15	5	0,95	7,45

Оценки  $\hat{c}$  параметра  $c$  так же, как и приведенные в табл. 1 и 2, подвержены небольшому разбросу, что уже обсуждалось выше. Как и следовало ожидать, оценки  $\hat{\omega}^*$  изменяются таким образом, что низкочастотная область спектра фильтра сужается по мере увеличения интенсивности помех. Это означает, что указанный параметр фильтра в процессе идентификации автоматическим образом, чтобы уменьшить составляющую искажений, связанную с помехами.

На рис. 6а в качестве примера приведено изображение «Лена», которое было искажено с параметром  $\sigma=3$  и подвергнуто зашумлению с  $SNR=35$  дБ. На рис. 6б приведено это же изображение после обработки фильтром с параметрами  $N=9$ ,  $\hat{\omega}^*=0,45$  и  $c=7,75$ , соответствующими максимальному значению  $PSNR=29,06$  (см. табл. 4).

Здесь же (ниже), на рис. 6в, для сравнения приведено изображение, которое получено путем обработки того же (искаженного и зашумленного) изображения фильтром Винера из библиотеки OpenCV. При этом было достигнуто значение  $PSNR=27,55$ , что существенно ниже достигнутого выше –  $29,06$ .

Низкое значение PSNR в некоторой степени объясняется значительными краевыми эффектами, возникающими при использовании фильтра Винера. Значение PSNR можно повысить, если «обрезать» изображение. В частности, на рис. 6г приведено то же изображение, обработанное фильтром Винера, после удаления с каждой стороны по 10 строк (столбцов). Для этого изображения PSNR составляет уже  $28,96$ . Это, конечно, значительно выше, но все-таки немного (на 0,1) меньше, чем у результата, достигнутого нами. Поскольку разница в значениях PSNR невелика (0,10), изображения, обработанные построенным фильтром (рис. 6б) и фильтром Винера (рис. 6в, г), визуально также слабо различимы.

Таким образом, установлено, что с использованием построенного фильтра возможно достижение качества (по показателю PSNR), превосходящего результат, по-

лучаемый с помощью фильтра Винера. Заметим также, что краевые эффекты в отличие от фильтра Винера в данном случае весьма незначительны.

### *Заключение*

Достоинство предложенной технологии построения КИХ-фильтров состоит в возможности достижения высокого качества восстановления путем настройки небольшого числа параметров непрерывной функции, аппроксимирующей импульсный отклик, соответствующий заданному частотному отклику. Известно, что подбор параметров фильтра Винера в случае неизвестных моделей искажений и помех является трудной задачей. В данном случае модели искажающей системы и шумов могут быть не известны, но доступны тестовые образцы изображений.

Если тестовые неискаженные изображения также недоступны, для идентификации можно использовать малые «отретушированные» фрагменты изображений, «вырезанные» на исходном искаженном изображении. Поскольку в данном случае оцениванию подлежат всего два параметра, даже при очень малых размерах фрагментов не возникнет проблема плохой обусловленности, характерная для задач идентификации.

Автор ограничился здесь задачей построения КИХ-фильтра для коррекции дефокусировки с радиальной симметрией искажений в интересах наглядности иллюстрации предлагаемой технологии. Рассмотренная здесь схема синтеза может быть применена для построения КИХ-фильтров для любых заданных частотных откликов.

### *Благодарности*

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ.

### *Литература*

1. **Прэтт, У.** Цифровая обработка изображений. Кн. 2. / У. Прэтт; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 480 с.
2. **Moreno, C.** Constructing FIR digital filters with valarray [Electronical Resource] / C. Moreno. – URL: <https://www.mochima.com/articles/FIR/FIR.html> (request date 03.10.2016).
3. **Ye, W.** Greedy algorithm for the design of linear-phase fir filters with sparse coefficients / W. Ye, Y.J. Yu / Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2016. – Vol. 35. – P. 1427. – DOI: 10.1007/s00034-015-0122-5.
4. Computer Image Processing, Part II: Methods and algorithms / ed. by V.A. Soifer. – VDM Verlag, 2010. – 584 p.
5. **Копенков, В.Н.** Алгоритм автоматического построения процедуры локальной нелинейной обработки изображений на основе иерархической регрессии /

- В.Н. Копенков, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 257-265.
6. **Fursov, V.A.** Identification of distorting systems with monitoring of data capacity / V.A. Fursov // 5-th International Workshop on Digital Image Processing and Computer Graphics «Image Processing and Computer Optics», Samara, Russia, Aug, 22-26, 1994, Proceedings of. – 1994. – Part 2.
7. **Fursov, V.A.** Correction of distortions in color images based on parametric identification / V.A. Fursov, A.V. Nikonov, S.A. Bibikov, P.Yu. Yakimov, E.Yu. Minaev // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Vol. 21(2). – P. 125-128. – DOI: 10.1134/S1054661811020349.
8. **Щербаков, М.А.** Нелинейная фильтрация с адаптацией к локальным свойствам изображения / М.А. Щербаков, А.П. Панов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 818-824.
9. **Arar, S.** FIR filter design by windowing: concepts and the rectangular window [Electronical Resource] / S. Arar. – URL: <http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/finite-impulse-response-filter-design-by-windowing-part-i-concepts-and-rect/> (request date 03.10.2016).
10. **Petrou, M.** Image Processing: Fundamentals / M. Petrou, C. Petrou. – 2<sup>nd</sup> ed. – John Wiley & Sons Ltd., 2010. – 818 p. – ISBN 978-0-470-74586-1.
11. **Баврина, А.Ю.** Метод параметрического оценивания оптико-электронного тракта системы дистанционного формирования оптического изображения / А.Ю. Баврина, В.В. Мясников, А.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 4. – С. 500-507.
12. **Кольцов, П.П.** Оценка размытия изображения / Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 95-102.
13. **Никонов, А.В.** Параллельная реализация двумерных БИХ-фильтров в распределенной системе обработки изображений / А.В. Никонов, М.Г. Милюткин, В.А. Фурсов // Вычислительные методы и программирование. Новые вычислительные технологии. Электронный научный журнал. – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 88-94.
14. **Fursov, V.A.** Construction of adaptive identification algorithms, using the estimates conformity principle / V.A. Fursov // 11<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013), Conference Proceedings, Samara, September 23-28, 2013, Conference Proceedings (Vol. I-II). – 2013. – Vol. 1. – P. 22-25.
15. **Fursov, V.A.** Constructing unified identification algorithms using a small number of observations for adaptive control and navigation systems / V.A. Fursov // Proceedings of SPIE. – 1997. – Vol. 3087. – P. 34-44. – DOI: 10.1117/12.277217.
16. **Льюнг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. / Л. Льюнг, под ред. Я.З. Цыпкина; пер. с англ. – М.: Наука, 1991. – 432 с. – ISBN 5-02-014511-4.
17. **Даджион, Д.Э.** Цифровая обработка многомерных сигналов / Д.Э. Даджион, Р.М. Мерсеро; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 488 с. – ISBN: 5-03-000402-5.

### *Сведения об авторе*

**Фурсов Владимир Алексеевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой суперкомпьютеров и общей информатики в Самарском университете. Область научных интересов: теория и методы оценивания по малому числу измерений, методы обработки и распознавания изображений, построение параллельных алгоритмов обработки и распознавания изображений, реализуемых с использованием многопроцессорных вычислительных систем. E-mail: [fursov@ssau.ru](mailto:fursov@ssau.ru).

ГПТИ: 28.19.31

Поступила в редакцию 6 октября 2016 г. Окончательный вариант – 18 ноября 2016 г.

## CONSTRUCTING FIR-FILTRES IN A GIVEN PARAMETRICAL CLASS OF FREQUENCY RESPONSE FOR DEFOCUS CORRECTION

V.A. Fursov<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

### Abstract

A problem of the restoration of defocused images is considered. For this purpose, we construct an FIR-filter by identifying the model from a special class of parameters with use of test images. The model of impulse response is defined in a class of univariate functions, which approximate the required frequency response in the radial direction. Samples of the two-dimensional impulse response are defined by discretization and the subsequent sample normalization. The approximation function class is defined so as to amplify low and suppress high spectrum frequencies. Important advantages of the method are high-quality image restoration and fast identification of filter's model due to the fact that the approximating function is determined by a small number of unknown parameters. In this article realization examples are given. These examples show the possibility of achieving the higher-quality restoration in comparison with the Wiener filter from the open-source image processing library OpenCV.

**Keywords:** FIR-filter, impulse response, frequency response, image processing.

**Citation:** Fursov VA. Constructing FIR-filters for a given parametrical class of frequency response for defocus correction. *Computer Optics* 2016; 40(6): 878-886. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-878-886.

**Acknowledgements:** The work was funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science.

### References

- [1] Pratt WK. *Digital Image Processing*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley and Sons; 1978.
- [2] Moreno C. Constructing FIR Digital Filters with valarray. Source: (<https://www.mochima.com/articles/FIR/FIR.html>).
- [3] Ye W, Yu YJ. Greedy algorithm for the design of linear-phase fir filters with sparse coefficients / *Circuits, Systems, and Signal Processing* 2016; 35: 1427. DOI: 10.1007/s00034-015-0122-5.
- [4] Soifer VA, ed. *Computer Image Processing, Part II: Methods and algorithms*. VDM Verlag; 2009.
- [5] Kopenkov VN, Myasnikov VV. An algorithm for automatic construction of computational procedure of non-linear local image processing on the base of hierarchical regression [In Russian]. *Computer Optics* 2012; 36(2): 257-265.
- [6] Fursov VA. Identification of distorting systems with monitoring of data capacity. 5-th International Workshop on Digital Image Processing and Computer Graphics. “Image Processing and Computer Optics”, Samara, Russia, Aug, 22-26, 1994. Pt 2.
- [7] Fursov VA, Nikonov AV, Bibikov SA, Yakimov PYu, Minaev EYu. Correction of distortions in color images based on parametric identification. *Pattern Recognition and Image Analysis* 2011; 21(2): 125-128. DOI: 10.1134/S1054661811020349.
- [8] Shcherbakov MA, Panov AP. Nonlinear filtering with adaptation to local properties of the image. *Computer Optics* 2014; 38(4): 818-824.
- [9] Arar S. FIR Filter Design by Windowing: Concepts and the Rectangular Window. Source: (<http://www.allabout-circuits.com/technical-articles/finite-impulse-response-filter-design-by-windowing-part-i-concepts-and-rect/>).
- [10] Petrou M, Petrou C. *Image Processing: Fundamentals*. 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd; 2010. ISBN 978-0-470-74586-1.
- [11] Bavrina AYu, Myasnikov VV, Sergeev AV. Method of parametric estimation of optoelectronic tract of remote sensed optical image formation [In Russian]. *Computer Optics* 2011, 35(4): 500-507.
- [12] Koltsov PP. Image blur estimation [In Russian]. *Computer Optics* 2011, 35(1): 95-102.
- [13] Nikonov AV, Milyutkin MG, Fursov VA. Parallel implementation of 2D IIR-filters using image processing distributed systems [In Russian]. *Numerical Methods and Programming. Scientific on-line open access journal* 2010, 11(1): 88-94.
- [14] Fursov VA. Construction of adaptive identification algorithms, using the estimates conformity principle. 11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013). Samara, September 23-28, 2013. *Conference Proceedings (Vol. I-II)* 2013; 1: 22-25.
- [15] Fursov VA. Constructing unified identification algorithms using a small number of observations for adaptive control and navigation systems. *Proc SPIE* 1997; 3087: 34-44. DOI: 10.1117/12.277217.
- [16] Ljung L. *System Identification. Theory for the User*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.; 1987. ISBN: 9780138816407.
- [17] Dudgeon DE, Mersereau RM. *Multidimensional digital signal processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.; 1984.



*Authors' information*

**Vladimir Alekseevich Fursov**, is Doctor of Engineering Science, Professor, head of Computer Science sub-department of Samara University, leading researcher. Research interests are development of the theory of estimation on small number of observations, development of methods of image processing and training to pattern recognition, development of high-performance parallel methods both algorithms of image processing and pattern recognition oriented on application of multiprocessor computing systems.

---

*Received October 6, 2016. The final version – November 18, 2016.*

---