

# АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ЦВЕТОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ

К.Г. Пугачев<sup>1</sup>, В.А. Фурсов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН

В статье исследуется технология построения линейных и нелинейных фильтров с целью устранения цветковых искажений, возникающих вследствие хроматической аберрации при регистрации изображений с использованием дифракционных линз. Для определения параметров фильтров используется метод согласованной идентификации по малым тестовым фрагментам, которые формируются из исходного искаженного изображения. Приводятся сравнительные результаты экспериментов, показывающие возможность достижения более высокого качества обработки нелинейным фильтром, параметры которого оценены с использованием согласованной идентификации.

## Введение

Функция размытия точки дифракционной линзы зависит от длины волны и подвержена различным искажениям, таким как муар и хроматическая аберрация. Коррекция хроматических аберраций в оптических системах, состоящих из одного элемента, возможна с использованием программной пост-обработки. При этом один из трех каналов является более четким по сравнению с другими (в данной работе это зеленый канал) и может быть использован в качестве опорного для восстановления двух остальных.

В работе исследуется технология определения параметров линейных и нелинейных двумерных фильтров для коррекции хроматических искажений. Задача решается с использованием метода согласованной идентификации параметров фильтра по тестовым фрагментам, формируемым из исходного искаженного изображения.

## Выделение фрагментов на изображениях

В качестве тестовых фрагментов используются участки изображения, имеющие перепад по яркости, характерный для резких границ на исходном неискаженном изображении. Вследствие искажений типа расфокусировки такие перепады на искаженном изображении имеют переходную область. Поэтому на исходном изображении ищутся фрагменты, которые условно можно разбить на три части: два крайних участка существенно различающиеся по яркости (в пределах которых яркость изменяется мало), и переходная область с плавным изменением яркости от одной «полки» к другой. На рисунке 1 приведен пример фрагмента 9×9 с переходной областью, в которой яркость изменяется по горизонтали, и маска КИХ-фильтра, которая используется в работе.

На каждом фрагменте определяются его параметры контраста и гладкости «полок». Величина контраста на фрагменте определяется как

$$H = \left| \bar{X}(1) - \bar{X}(2) \right|, \quad (1)$$

где  $\bar{X}(1)$ ,  $\bar{X}(2)$  - средние значения яркости на левой и правой части (здесь и далее имеется в виду горизонтальный фрагмент):

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad j = 1, 2. \quad (2)$$

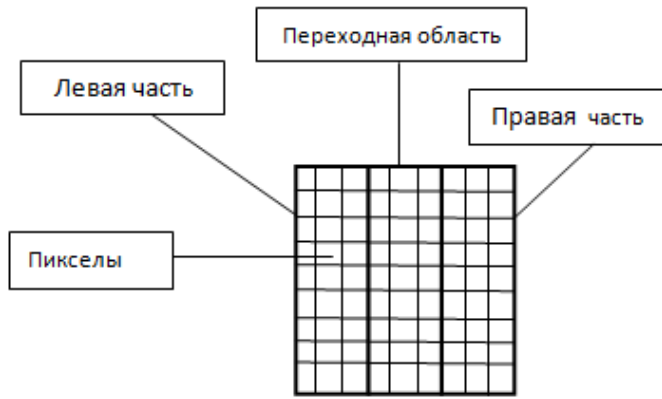


Рисунок 1 - Горизонтальный фрагмент

Здесь  $N = n * m$ ,  $n$  - размер фрагмента в пикселах по вертикали,  $m$  - ширина левой или правой части в пикселах.

Гладкость (левой и правой части) характеризуется величиной

$$D = d(1) + d(2),$$

где  $d(1)$ ,  $d(2)$  - соответственно значения СКО на левой и правой части:

$$d(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X}(j))^2}, \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

Пробегая по всему изображению, рассматриваем все возможные фрагменты заданного размера. Для отбора наиболее пригодных фрагментов сначала сортируем полученные на изображении фрагменты в порядке убывания контраста. Из них отбираем часть наиболее контрастных. После чего сортируем выбранные фрагменты в порядке возрастания гладкости и отбираем заданное количество «наилучших» фрагментов (с наименьшим среднеквадратичным отклонением).

#### Формулировка задачи идентификации линейных по параметрам фильтров

Рассмотрим построение линейных по параметрам КИХ-фильтров [1] на основе маски размером  $3 \times 3$ . Данная маска показана на рисунке 2.

Линейный фильтр строится в виде

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3, \quad (4)$$

где  $y$  - значение на выходе,  $x_1 = x_{i,j}$ ,  $x_2 = \frac{(x_{i-1,j} + x_{i+1,j} + x_{i,j-1} + x_{i,j+1})}{4}$ ,

$$x_3 = \frac{(x_{i-1,j-1} + x_{i-1,j+1} + x_{i+1,j-1} + x_{i+1,j+1})}{4}.$$

Соответствующий этой же маске нелинейный фильтр имеет вид

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2^2 + a_3 x_3, \quad (5)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  те же, что и в (3).

Для  $M$  положений опорной области, соответствующей показанной на рисунке 2 маске, формируется матричное уравнение:

$$Xa = b + \xi, \quad (6)$$

где  $X \in R^{n \times m}$  - матрица системы,  $a \in R^m$  - вектор решения,  $b \in R^n$  - вектор правой части и  $\xi \in R^n$  - вектор ошибок,  $n$  - число строк матрицы системы,  $m$  - число столбцов матрицы системы,  $n > m$ . Т.е.

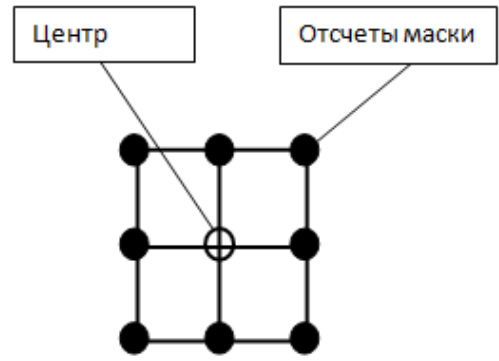


Рисунок 2 - Маска КИХ-фильтра 3x3

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_n \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Задача идентификации заключается в нахождении решения  $a$  данной системы. Каждая строка этой системы соответствует соотношению (4) или (5), а  $N$  - количество точек фрагмента, участвующих в формировании системы. Искомый вектор оценок параметров из (7) может быть вычислен по методу наименьших квадратов:

$$a = [X^T X]^{-1} X^T b.$$

В настоящей работе для определения искомого вектора параметров применяется метод согласованной идентификации.

### Описание алгоритма согласованной идентификации

Поясним метод согласованной идентификации [2] для получения решения переопределенной системы (6). Идея метода состоит в нахождении наименее зашумленной подсистемы. Для этого из  $n$  строк формируется

$$C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!}$$

подсистем верхнего уровня размерности  $p$ . В свою очередь в каждой подсистеме верхнего уровня выделяется

$$C_p^m = \frac{p!}{m!(p-m)!}$$

подсистем нижнего уровня размерности  $m$ .

Мы полагаем, что подсистема верхнего уровня является наиболее свободной от шума, если полученные на ней оценки для подсистем нижнего уровня наиболее согласованы. Подсистема верхнего уровня является наиболее согласованной, если достигается минимум следующего критерия согласованности

$$\theta = \sum_{i=0}^{C_p^m} \sum_{j=i+1}^{C_p^m} \|a_i - a_j\|^2, \quad (8)$$

где  $a_i$  и  $a_j$  - векторы решений, полученные на  $i$ -й и  $j$ -й подсистеме нижнего уровня данной подсистемы верхнего уровня.

Таким образом, алгоритм согласованной идентификации сводится к выполнению следующих шагов:

1. Вычисляем решения на подсистемах нижнего уровня каждой подсистемы верхнего уровня.
2. Используя полученные решения, определяем критерий согласованности.
3. Сравниваем критерии согласованности всех подсистем верхнего уровня.
4. Выбираем «лучшую» подсистему верхнего уровня и вычисляем искомую точечную оценку, например, методом наименьшим квадратов (МНК) [3].

### Проведение эксперимента и оценка результатов

Для построения фильтров были выделены тестовые фрагменты размером  $6 \times 6$  пикселей, содержащие контуры. После чего они были обработаны так, чтобы наблюдалась точная граница. На рисунке 3 представлены примеры выделенных и обработанных фрагментов.



Рисунок 3 – Тестовые фрагменты: а) выделенный фрагмент с нечетким переходом от темного к светлому; б) обработанный фрагмент четким с переходом от темного к светлому; в) выделенный фрагмент с нечетким переходом от светлого к темному; г) обработанный фрагмент с четким переходом от светлого к темному

В ходе проведения эксперимента были построены линейные и нелинейные фильтры, рассчитанные с использованием согласованной идентификации по фрагментам, выделенным на изображении. Также был рассчитан нелинейный фильтр с использованием метода наименьших квадратов. На рисунке 4 показаны результаты обработки данными фильтрами.

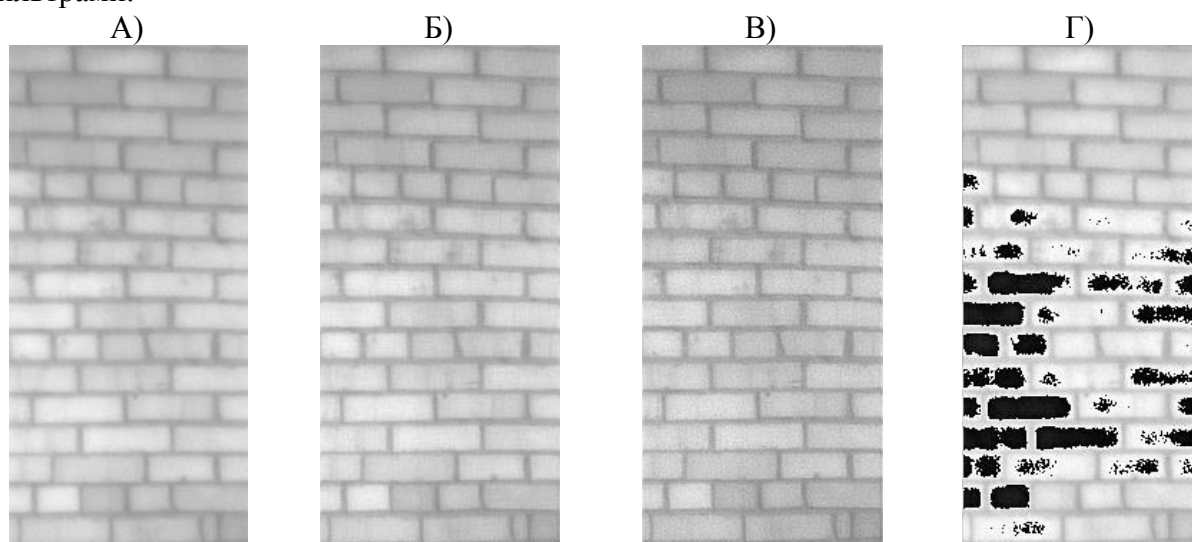


Рисунок 4 – Исходное изображения (а) и обработанные линейным фильтром, полученным МСИ (б); нелинейным фильтром, полученным МСИ (в); нелинейным фильтром, полученным МНК

По полученным изображениям видно, что хотя зашумленность и несколько повысилась, четкость значительно возросла. В связи с тем, что метод наименьших квадратов достаточно чувствителен к ошибкам, на полученном изображении наблюдается большое количество артефактов.

### Заключение

Установлено, что по малым тестовым фрагментам можно построить эффективные восстанавливающие фильтры. Введение нелинейности несколько улучшает качество восстановления, изображения воспринимаются как более четкие. Во всех случаях метод согласованной идентификации позволяет построить более хороший фильтр, чем с применением обычного метода наименьших квадратов. Связано это с тем, что метод наименьших квадратов весьма чувствителен к ошибкам в исходных данных.

### Литература

1. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. - Москва: Мир, 1988.
2. Фурсов В.А. Адаптивная идентификация по малому числу исключений - Новые технологии, 2013.
3. Фурсов В.А. Идентификация систем по малому числу наблюдений - Самара: СГАУ, 2007.