

# Технология формирования адаптивных восстанавливающих фильтров в мобильных устройствах

В.А. Фурсов<sup>1,2</sup>, К.С. Медведева<sup>1,2</sup>, Э.Ф. Фатхутдинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** В работе рассматривается технология формирования адаптивных фильтров для устранения искажений типа дефокусировки на изображениях, регистрируемых с помощью мобильных устройств. Цель разработки – обеспечить достаточно высокое качество коррекции искажений при минимальных вычислительных затратах. Для настройки параметров фильтра используется слепая параметрическая идентификация модели с радиально-симметричным квадратично-экспоненциальным частотным откликом. Приводятся алгоритм, псевдокод программы и результаты экспериментов, демонстрирующие эффективность предложенного подхода.

## 1. Введение

В последние годы возрастает интерес к проблеме обработки изображений, регистрируемых мобильными устройствами. Это связано с возможностью оперативной регистрации естественных сюжетов и сцен при сравнительно небольших затратах. Однако эти изображения часто подвержены искажениям, которые проявляются в виде размытия. Это может быть связано с малой глубиной резкости объектива. Кроме того, размытие изображений часто возникает вследствие того, что съемка выполняется «с рук», а также при движении регистрируемого объекта с большой скоростью.

В последнее время в ряде работ активно обсуждается также идея регистрации изображений приборами, построенными с использованием дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [1], [2]. В данном случае надежды связывают с совершенствованием технологии создания ДОЭ, в частности, с созданием объективов на основе изображающей линзы Френеля [3], [4]. К сожалению, качество изображений, формируемых с помощью ДОЭ, пока заметно ниже изображений традиционных оптических систем. Возможно, создание компактных мобильных приложений цифровой обработки изображений, которые в какой-то степени могут скомпенсировать этот недостаток, дало бы новый толчок для построения мобильных приборов на основе ДОЭ.

Указанные обстоятельства послужили мотивом для проведения исследований, результаты которых приводятся в настоящей работе. Мы поставили задачу разработки технологии, которая обеспечивала бы сравнительно высокое качество коррекции искажений при минимальных вычислительных затратах, допускающих реализацию технологии в мобильных устройствах. Исходя из этой цели, в настоящей работе мы строим технологию формирования адаптивных восстанавливающих фильтров в классе фильтров, являющихся обобщением квадратично-экспоненциального (SE-фильтра) рассмотренного в работе [5].

## 2. Постановка задачи

Будем строить КИХ-фильтр с радиально симметричным вещественным частотным откликом [5], представляемым в виде поверхности, образованной поворотом одномерного частотного отклика вокруг начала координат. Функция одномерного частотного отклика для всех значений  $0 \leq \omega < \infty$  задается в виде трех последовательных отрезков: параболы, константы и экспоненты:

$$S(\omega) = \begin{cases} \alpha\omega^2, & \text{при } 0 \leq \omega < \omega_1, \\ A = const = \alpha\omega_1^2, & \text{при } \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2, \\ e^{-i\omega}, & \text{при } \omega \geq \omega_2, \end{cases} \quad (1)$$

$$S(\omega_2) = \alpha\omega_1^2 = e^{-c\omega_2}.$$

Фильтр, соответствующий этому частотному отклику, далее будем называть квадратично экспоненциальным фильтром (*Square-Exponential*) или кратко SE-фильтром.

Соответствующий этой спектральной характеристике импульсный отклик, в силу свойства радиальной симметрии, получаем как функцию пространственного параметра  $r$ , применяя обратное преобразование Фурье:

$$h(r) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^\infty S(\omega) e^{j\omega r} d\omega = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left\{ \int_0^{\omega_1} \alpha\omega^2 e^{j\omega r} d\omega + \int_{\omega_1}^{\omega_2} A e^{j\omega r} d\omega + \int_{\omega_2}^\infty e^{-c\omega} e^{j\omega r} d\omega \right\} =$$

$$= \frac{e^{-c\alpha\omega_1}}{\pi} \left( \frac{\sin \omega_1 r}{r} \sin \omega_1 r + \frac{2 \cos \omega_1 r}{r^2 \omega_1} - \frac{2 \sin \omega_1 r}{r^3 \omega_1} + \left( \frac{\sin \omega_1 r - \sin \alpha \omega_1 r}{r} \right) + \left( \frac{c \cos \alpha \omega_1 r - r \sin \alpha \omega_1 r}{c^2 + r^2} \right) \right). \quad (2)$$

$$h(0) = \lim_{r \rightarrow 0} h(r) = \frac{\omega_1 c (3\alpha - 2) + 3}{3c\pi} e^{-c\alpha\omega_1} \quad (3)$$

(мы исключили  $\alpha$  и  $\omega_2$ , выполнив с учетом (1) замену  $\alpha = \frac{e^{-c\omega_2}}{\omega_1^2}$  и положив  $\omega_2 = \alpha\omega_1$ ).

В пространственной области зададим опорное окно  $D$  в виде  $N \times N$  квадрата с центром в точке  $k_1 = 0, k_2 = 0$ . В предположении, что центральный отсчет импульсного отклика  $h(0)$  опорного окна  $D$  находится в точке  $n_1, n_2$ , отсчеты восстановленного изображения  $y(n_1, n_2)$  можно представить в виде:

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1 = -\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{k_2 = -\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} h[r(k_1, k_2)] x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) \quad (4)$$

где  $r(k_1, k_2) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ , а  $h[r(k_1, k_2)]$  – отсчеты одномерной импульсной характеристики, определенные на множестве окружностей с радиусами  $r = r(k_1, k_2), k_1, k_2 \in D$ .

Отсчеты двумерного импульсного отклика определяются путем дискретизации непрерывной функции (2) для всех направлений, соответствующих всем отсчетам опорной области [5]. При этом для каждого отсчета (точки  $k_1, k_2$ ) опорной области в соотношении (2) аргумент  $r = r(k_1, k_2) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ . Затем осуществляется нормировка всех отсчетов в опорной области так, чтобы выполнялось требование сохранения среднего уровня яркости обработанного изображения:  $\sum h(k_1, k_2) = 1, \forall k_1, k_2 \in D$  (5).

В работе [5] была реализована традиционная технология покомпонентной обработки цветных RGB-изображений в рамках описанной модели SE-фильтра. В настоящей работе с использованием этой же модели фильтра мы построим технологию, которая позволяет сократить объем вычислений. Все эксперименты проводятся на изображениях, зарегистрированных с помощью дифракционного объектива, построенного на основе линзы Френеля.

### 3. Технология обработки изображений с настройкой параметров фильтра

С использованием описанной выше квадратично-экспоненциальной модели частотного отклика построим несколько вариантов технологии, учитывающей специфические особенности искажений изображений, формируемых с помощью ДООЭ. Известно, что для изображающей линзы Френеля характерной является достаточно сильная зависимость показателя преломления от длины волны. Вследствие этого, имеют место значительные различия фокусных расстояний для различных цветовых компонент. Поэтому в зависимости от расстояния от линзы до регистрирующей матрицы цветовые компоненты могут иметь существенно различающуюся степень размытия. С учетом этого будем строить базовую технологию покомпонентной обработки RGB-изображений, в которой параметры модели восстанавливающего фильтра в разных цветовых каналах определяются независимо и могут сильно различаться. Покомпонентная обработка RGB-изображений реализуется с помощью следующего алгоритма.

#### Алгоритм 1.

1. Выделение из обрабатываемого изображения одного компонента (R, G или B).
2. Задание начальных оценок параметров  $\hat{\omega}_{1,n}, \hat{c}_n, \hat{\alpha}_n$  и критерия  $Q(\hat{\omega}_{1,n}, \hat{c}_n, \hat{\alpha}_n)(n=0)$  для монохромного изображения выбранного компонента.
3. Вычисление отсчетов импульсного отклика для всех точек опорной области  $D(n_1, n_2)$  с использованием соотношений (2), (3) и нормировка всех отсчетов, удовлетворяющая (5).
4. Обработка искаженного монохромного изображения в соответствии с (4).
5. Вычисление и проверка критерия улучшения качества обработанного изображения: если  $PSNR(X, \hat{X}(\omega_{1,n}, c_n, \alpha_n, N_n)) > PSNR(X, \hat{X}(\omega_{1,n-1}, c_{n-1}, \alpha_{n-1}, N_{n-1}))$  (6), при условиях  $D(\hat{X}_n) > D(\hat{X}_{n-1}), PSNR(X, \hat{X}(\omega_{1,n}, c_n, \alpha_n, N_n)) > PSNR_{дон}$ , оценки  $\hat{\omega}_{1,n}, \hat{c}_n, \hat{\alpha}_n$  сохраняются. Если не все оценки из области допустимых значений «просмотрены» – формируется новый вариант оценок и осуществляется переход к шагу 3.
6. Если не все компоненты (R, G и B) обработаны чвыделение из обрабатываемого изображения следующего компонента и переход к шагу 2, иначе выход.
7. Сборка полноцветного RGB-изображения.

Наряду с описанной базовой технологией бы рассмотрим также технологию обработки изображений в цветовом пространстве LAB. Известно, что в этом цветовом пространстве компонент *L* содержит информацию об искажениях типа дефокусировки, поэтому для устранения искажений достаточно обработать только один компонент. В связи с этим представляет интерес выяснить возможно ли при этом сокращение объема вычислений? Алгоритм обработки с настройкой параметров фильтра в цветовом пространстве LAB имеет вид.

#### Алгоритм 2:

1. Переход от цветовой модели RGB к LAB.
2. Задание начальных оценок параметров  $\hat{\omega}_{1,n}, \hat{c}_n, \hat{\alpha}_n$  и критерия  $Q(\hat{\omega}_{1,n}, \hat{c}_n, \hat{\alpha}_n)(n=0)$  для монохромного изображения *L* - компонента.
3. Вычисление отсчетов импульсного отклика для всех точек опорной области  $D(n_1, n_2)$  с использованием соотношений (3), (4) и нормировка всех отсчетов, удовлетворяющая (5).
4. Обработка искаженного монохромного *L* - компонента изображения в соответствии с (4).
5. Вычисление и проверка критерия улучшения качества обработанного изображения: если  $PSNR(X, \hat{X}(\omega_{1,n}, c_n, \alpha_n, N_n)) > PSNR(X, \hat{X}(\omega_{1,n-1}, c_{n-1}, \alpha_{n-1}, N_{n-1}))$  (6), при условиях  $D(\hat{X}_n) > D(\hat{X}_{n-1}), PSNR(X, \hat{X}(\omega_{1,n}, c_n, \alpha_n, N_n)) > PSNR_{дон}$   $D(\hat{X}_n) > D(\hat{X}_{n-1})$ , оценки  $\hat{\omega}_{1,n}, \hat{c}_n, \hat{\alpha}_n$  сохраняются. Если не все оценки из области допустимых значений «просмотрены» – формируется новый вариант оценок и осуществляется переход к шагу 3.
6. Переход от LAB к RGB.

Заметим, что в обоих приведенных выше алгоритмах реализуется слепая идентификация параметров фильтра (без эталонного изображения). С использованием алгоритмов I и II возможны различные варианты реализации технологии. В таблице 1 приведены технологии, которые будут исследоваться в настоящей работе.

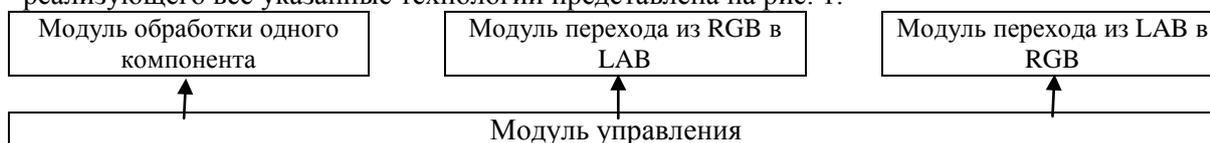
**Таблица 1.** Технологии обработки изображений с настройкой параметров фильтра.

№ п/п	Технологии с предварительной слепой настройкой параметров фильтра
1	Обработка одного, наиболее «размытого» (R, G или B) компонента
2	Обработка всех трех (R, G и B) компонент с независимой настройкой параметров фильтров
3	Обработка L-компонента в цветовом пространстве LAB без предварительной обработки RGB-изображения
4	Обработка L-компонента в LAB с предварительной обработкой одного наиболее «размытого» компонента RGB-изображения
5	Обработка L-компонента в LAB с предварительной обработкой всех компонент RGB-изображения

Алгоритмы настройки параметров фильтра и обработки одного (R, G или B) компонента RGB-изображения и/или L-компонента в цветовом пространстве LAB одинаковы. Поэтому для реализации любой из указанных в таблице 1 технологий достаточно создание программной функции обработки одного компонента. Кроме того, необходимо также реализовать программный код перехода от RGB в LAB и обратно.

**4. Реализация мобильного приложения**

Из таблицы 1 видно, любая из указанных в этой таблице технологий может быть реализована путем различной организации трех программных модулей: обработка одного компонента, переход из RGB в LAB и обратный переход из LAB в RGB. Общая схема приложения, реализующего все указанные технологии представлена на рис. 1.



**Рисунок 1.** Общая схема автоматизированного формирования технологии обработки.

Здесь модуль управления обеспечивает адаптивное автоматизированное управление выбором технологии обработки. Этот модуль реализует программу – планировщик, которая устанавливает последовательность подключения модулей обработки и переходов в цветовые пространства. Выбор номера технологии осуществляется пользователем.

На рисунке 2, а представлен псевдокод программного модуля, реализующего обработку одного компонента, на рисунке 1, б – псевдокод программного модуля, реализующего алгоритм перехода из RGB в LAB, а на рисунке 2, в – псевдокод программного модуля обратного перехода из LAB в RGB.

```

a) Ввод: искаженное изображение – source_image_RGB
для source_image_RGB выделить наиболее искаженный канал, например, синего канала –
source_image_B
для source_image_blue_B выполнить
Начало функция image_processing
для w ∈ (w_in, w_end)/c ∈ (c_in, c_end)/α ∈ (α_in, α_end) с шагом step_w/step_c/step_α выполнить
начало функция l
для i ∈ (1, N) с шагом 1 выполнить
для j ∈ (1, N) с шагом 1 выполнить
    
```

$$r = \sqrt{\left(i - \frac{N+1}{2}\right)^2 + \left(j - \frac{N+1}{2}\right)^2}$$

если  $r > 0,5$  то

$$h(i, j) = \frac{\exp(-c\alpha\omega_1)}{\pi} \left( \frac{\sin \omega_1 r}{r} \sin \omega_1 r + \frac{2 \cos \omega_1 r}{r^2 \omega_1} - \frac{2 \sin \omega_1 r}{r^3 \omega_1^2} + \left( \frac{\sin \alpha \omega_1 r - \sin \omega_1 r}{r} \right) + \left( \frac{c \cos \alpha \omega_1 r - r \sin \alpha \omega_1 r}{c^2 + r^2} \right) \right)$$

конец  
конец  
конец  
конец  
начало функция2  
для  $i \in (1, N)$  с шагом 1 выполнить  
для  $j \in (1, N)$  с шагом 1 выполнить

$$XR(k, l) = XR(k, l) + X \left( k - \frac{N+1}{2} + i, l - \frac{N+1}{2} + j \right) h(i, j)$$

конец  
конец  
конец  
вычисляем значение критерия PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX^2}{MSE} \right)$$

если вычисленное значение PSNR < предыдущего значения PSNR и  
дисперсия обработанного изображения(XR) > дисперсия искаженного изображения (X) то  
**запоминаем** значение параметров w/c/a  
**запоминаем** значение PSNR  
конец  
вызываем **функция1** и **функция2** с новыми параметрами w, c, a  
вывод: обработанное изображение source\_image\_B.  
Конец  
для source\_image\_RGB добавить синий канал из source\_image\_B

<p>б) <u>Для</u> source_image_RGB <u>выполнить</u> source_image_Lab[X][Y][Z] = source_image_RGB</p> $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412453 & 0.357580 & 0.180423 \\ 0.212671 & 0.715160 & 0.072169 \\ 0.019334 & 0.119193 & 0.950227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$ <p><math>X = \frac{X}{X_n}, X_n = 0.950456</math> <math>Z = \frac{Z}{Z_n}, Z_n = 1.088754</math></p> $L = \begin{cases} 116 \cdot Y^{\frac{1}{3}} - 16, & \text{если } Y > 0.008856 \\ 903.3 \cdot Y, & \text{если } Y \leq 0.008856 \end{cases}$ <p><math>a = 500(f(X) - f(Y)) + \delta,</math> <math>b = 200(f(Y) - f(Z)) + \delta,</math></p> $f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}}, & \text{если } t > 0.008856, \\ 7.787 \cdot t + \frac{16}{166}, & \text{если } t \leq 0.008856 \end{cases}$	<p>в) <u>для</u> source_image_Lab <u>выполнить</u></p> $X = \left( f_x - \frac{16}{116} \right) 3\delta^2 X_n, \text{ где } f_x = f_y + \frac{a}{500},$ $Y = \left( f_y - \frac{16}{116} \right) 3\delta^2 Y_n, \text{ где } f_y = (L + 16) \cdot 116,$ $Z = \left( f_z - \frac{16}{116} \right) 3\delta^2 Z_n, \text{ где } f_z = f_y - \frac{b}{200}$ <p>source_image_RGB[R][G][B] = = source_image_LAB[X][Y][Z] ·</p> $\begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.55648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix}$ <p><u>конец</u> <u>Вывод:</u> обработанное изображение - source_image_RGB</p>
--	--

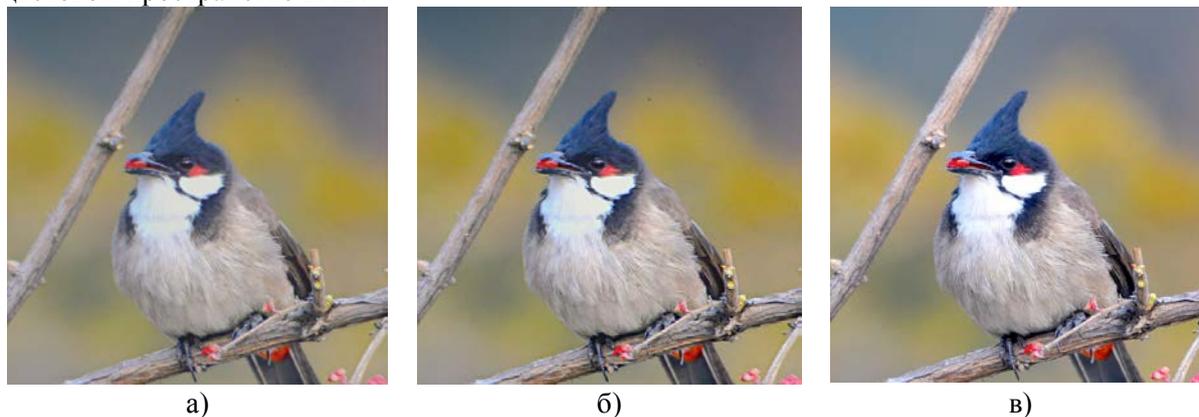
$\delta = \begin{cases} 128, & \text{если 8-битное изображение,} \\ 0, & \text{если изображение с плавающей точкой} \end{cases}$ <p><u>конец</u>          для L-компоненты изображения source_image_Lab          вызов <b>функция image_processing</b> с вычисленными значениями параметров w/c/a</p>	
---	--

**Рисунок 2.** Псевдокоды программных модулей: обработка компонента - а); переход из RGB в LAB - б); переход из LAB в RGB - в).

При разработке мобильного приложения используется библиотека OpenCV. OpenCV работает под множество платформ – Linux, Windows и Mac OS – написана на языке высокого уровня (C/C++), содержит алгоритмы интерпретации изображений, калибровки камеры по эталону, устранения оптических искажений, определения сходства, анализа перемещения объекта и многое другое, а также используется параллельность и многоядерность для выполняемых задач.

### 5. Результаты экспериментов

В экспериментах использовались изображения «Синица» и «Вероника», приведенные на рисунках 3,а и 4,а соответственно. Изображения получены съемкой объективом с линзой Френеля. Первый эксперимент состоял в сравнительном исследовании эффективности технологий обработки изображений, указанных в таблице 1. В этом эксперименте использовалось только изображение «Синица», т.к. для этого изображения наряду с дифракционными имеется также образец, полученный с использованием оптики высокого разрешения, который может использоваться в качестве эталона для оценки качества коррекции. На рисунке 3,б приведено изображение «Синица», восстановленное с использованием технологии 2, т.е. путем независимой настройки параметров фильтров на всех трех компонентах RGB-изображения. На рисунке 3,в то же изображение «Синица», полученное в результате реализации технологии 2 и восстановленное с использованием технологии 5 – в цветовом пространстве LAB.



**Рисунок 3.** Изображения: исходное – а); обработанные: технология 3 – б), технология 5 – в).

В таблице 2 приведены результаты сравнительных исследований качества и вычислительной сложности технологий, основанных на использовании RGB и LAB представлений. Качество изображения «Синица» оценивалось по критерию PSNR в сравнении с эталонным изображением. Порядковые номера технологий (в скобках) совпадают с номерами технологий, описания которых приведены в таблице 1.

В первой строке таблицы приведены результаты, полученные с использованием традиционной схемы обработки в цветовом пространстве RGB с формированием общего фильтра для всех цветовых компонентов. Заметим, при обработке в цветовом пространстве LAB качество

несколько выше (технология 3), однако при этом существенно возрастает время обработки (24.72).

**Таблица 2.** Сравнение эффективности технологий на изображении «Синица».

Технология	Время (с)	$\hat{\omega}_{1,n}$	$\hat{c}_n$	$\hat{\alpha}_n$	PSNR	
RGB с совместной обработкой каналов	14.70	0.83	9	0.9	26.970	
(1) Обработка В-канала в RGB изображении	7.71	1.01	10	1	25.191	
(2) Независимая настройка фильтров в каналах R,G,B	R	7.12	0.81	9	0.95	27.492
	G	7.20	0.83	9	0.93	
	B	7.71	1.01	10	1	
(3) LAB без предварительной обработки	24.72	0.85	8	0.95	27.086	
(4) LAB с обработкой синей компоненты (B)	25.43	0.85	8	0.95	27.636	
(5) Независимая обработка R,G,B + LAB	26.74	0.85	8	0.95	28.883	

Технология с независимой настройкой фильтров по всем каналам RGB дает уже заметный выигрыш качества (PSNR = 27.492) по сравнению с обоими указанными вариантами обработки (RGB с общим фильтром и LAB без предварительной обработки). Технология (4) обработки в LAB – пространстве с предварительной обработкой одной, наиболее «размытого» (в данном случае синей), компонента, позволяет еще улучшить результат (PSNR = 27.636). Наконец наиболее хорошее качество (PSNR = 28.883) достигается с помощью технологии обработки в цветовом пространстве LAB после предварительной обработки в пространстве RGB с независимой настройкой фильтров для каждой компоненты. Заметим, что в этом случае существенно возрастает время обработки.

С использованием этих свойств можно строить адаптивные восстанавливающие фильтры в широком диапазоне характеристик. С использованием разработанной схемы пользователю мобильного приложения достаточно выбрать соответствующую технологию, исходя из требований по качеству и доступных ресурсов.

На рисунке 4,б и 4,в в качестве примера использования исследуемых технологий приведены изображения, полученные обработкой исходного изображения «Вероника» в RGB и LAB пространстве соответственно.



**Рисунок 4.** Изображение «Вероника»: исходное – а); обработанное в RGB – б); обработанное в Lab с предварительной обработкой в RGB – в).

Этот пример интересен тем, что для этого изображения не существует эталонного. Параметры фильтра настраиваются методом слепой идентификации. Поэтому мы не можем для этих изображений дать объективную оценку качества по критерию PSNR. В данном случае возможна только визуальная оценка качества. Аналогично, как и в предыдущем примере, обработка RGB-изображения позволила удалить часть искажений, но сохранив небольшую нечеткость мелких деталей. Обработка в LAB-пространстве «справилась» с искажениями на мелких деталях и позволила ярче и насыщенней передать цвета.

## 6. Заключение

Реализована технология восстановления изображений, регистрируемых с помощью изображающей линзы Френеля. Разработана программа на платформе Android, предназначенная для обработки изображений в мобильных устройствах. Приведен пример обработки тестовых дифракционных приложений без использования эталона. Результат, полученный при восстановлении дифракционного изображения «Синица» имеет показатель PSNR = 28.88. Полученные результаты могут заинтересовать пользователей планшетов и смартфонов.

## 7. Литература

- [1] Никоноров, А.В. Реконструкция изображений в дифракционно-оптических системах на основе сверточных нейронных сетей и обратной свертки / А.В. Никоноров, М.В. Петров, С.А. Бибииков, В.В. Кутикова, А.А. Морозов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 875-887. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-875-887.
- [2] Казанский, Н.Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 425-434.
- [3] Хонина, С.Н. Бинарная линза: Исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 339-346.
- [4] Казанский, Н.Л. Вычислительный эксперимент с линзой Френеля // Компьютерная оптика. – 1988. – № 3. – С. 22-28.
- [5] Фурсов, В.А. Построение квадратично-экспоненциальных КИХ-фильтров с расширенной средней областью частотного отклика // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 297-305. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-297-305.
- [6] Петров, М.В. Цветовая коррекция в изображающих дифракционно-оптических системах на основе трехмерных LUT таблиц / М.В. Петров, А.В. Никоноров // Информационные технологии и нанотехнологии, 2017. – С. 115-121.
- [7] Fursov, V.A. Identification of square-exponential FIR-filter parameters in the absence of a test image // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 206-212. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.611.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 2.891.2017) и РФФИ (проект № 17-29-03112).

# The technology of forming adaptive recovery filters in mobile devices

V.A. Fursov<sup>1,2</sup>, K.S. Medvedeva<sup>1,2</sup>, E.F. Fatkhutdinova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** In this paper we propose the technology of forming adaptive filters to eliminate the defocusing type distortions on images recorded using mobile devices. The main purpose of the development is to ensure a sufficiently high quality of the distortion correction with minimal computational costs. To adjust the filter parameters, a blind parametric identification of the model with a radially symmetric quadratic-exponential frequency response is used. The algorithm, the pseudo-code of the program and the results of experiments demonstrating the effectiveness of the proposed approach are given.