



В.А. Фурсов, П.Ю. Якимов

**Интернет-технология коррекции  
динамических искажений на  
изображениях в мобильных  
устройствах**

***Рекомендуемая форма библиографической ссылки***

Фурсов В.А., Якимов П.Ю. Интернет-технология коррекции динамических искажений на изображениях в мобильных устройствах // Научный сервис в сети Интернет: труды XIX Всероссийской научной конференции (18-23 сентября 2017 г., г. Новороссийск). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2017. — С. 436-445. — URL: <http://keldysh.ru/abrau/2017/09.pdf>  
doi:[10.20948/abrau-2017-09](https://doi.org/10.20948/abrau-2017-09)

**Размещена также [презентация к докладу](#)**

# Интернет-технология коррекции динамических искажений на изображениях в мобильных устройствах

В.А. Фурсов<sup>1,2</sup>, П.Ю. Якимов<sup>1</sup>

*1 Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева*

*2 Институт систем обработки изображений РАН –  
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН*

**Аннотация.** Предлагается технология коррекции изображений в мобильных устройствах, основанная на использовании параметризованного КИХ-фильтра. КИХ-фильтр строится с использованием частотного отклика, заданного в виде параметрического семейства центрально-симметричных частотных характеристик. Используется модель одномерного частотного отклика в виде отрезков квадратичной и экспоненциальной функций. Рассматриваются две схемы настройки параметров фильтра: по тестовому изображению и с использованием критерия, не требующего сравнения обработанного изображения с эталонным. Приводятся примеры реализации, иллюстрирующие возможность достижения высокого качества коррекции искажений.

**Ключевые слова:** Интернет-технология, изображения, искажения, КИХ-фильтр

## 1. Введение

В последние годы в Интернет-сети происходит бурный рост числа пользователей, подключенных с помощью мобильных приборов. Одной из наиболее популярных функций мобильных приборов является регистрация изображений. Основным мотивом, по-видимому, является возможность оперативной регистрации изображений в неожиданных и уникальных ситуациях. Вместе с тем, несмотря на достигнутые в последние годы высокие оптические характеристики регистрирующих устройств, качество изображений оказывается не всегда высоким. В частности, при съемке «с рук» или при быстром перемещении регистрируемого объекта возникают динамические искажения. Поэтому актуальна задача коррекции искажений на изображениях с помощью, как встроенных в мобильные приборы, так и доступных по сети Интернет алгоритмов цифровой обработки изображений.

Наиболее подходящими для этой цели во многих отношениях являются КИХ-фильтры [1]. Простейшими в этом классе, с точки зрения реализации, являются инверсные КИХ-фильтры [2]. Задача построения инверсного фильтра

сводится к определению обратного оператора искажающей системы. При этом основная проблема состоит в том, что соответствующая передаточная функция может иметь полюса близкие к нулю, а обратный оператор не существует.

Указанная проблема преодолевается путем непосредственной идентификации фильтра по прецедентам [3]. При этом параметры восстанавливающего фильтра определяются по заданному тестовому и исходному искаженному изображениям [4]. В результате идентификации параметры фильтра подбираются с учетом реальных помех [5] на искаженном изображении. В рамках этого подхода должны быть заданы параметрический класс моделей фильтра и тестовые (желаемые) изображения [2].

Задание параметрического класса моделей фильтра имеет также важное значение с точки зрения вычислительной сложности алгоритма обработки. В работе [6] исследовалась возможность снижения требований к вычислительным ресурсам путем использования математической модели искажающей системы с малым числом неизвестных параметров. Методы и алгоритмы параметрической идентификации моделей искажений изображений по малому числу наблюдений исследовались авторами в работе [7].

Не менее важной, но, пожалуй, более сложной является задача задания тестовых (желаемых) изображений. В работе [8] одним из авторов предложена технология параметрической идентификации по тестовым фрагментам, формируемым непосредственно из искаженного изображения путем «компьютерного ретуширования» небольших участков искаженного изображения. Эта идея использовалась также в других работах автора. Однако в случае обработки изображений на мобильном устройстве трудно представить пользователя, который будет специально создавать такой тестовый фрагмент, даже если он имеет малые размеры. Очевидный способ преодолеть эту трудность – снабдить прибор интерфейсом, с использованием которого пользователь может подобрать параметры фильтра путем пробных попыток обработки. К сожалению, подбор параметров фильтра вручную, по результатам пробных попыток (как показывает опыт Photoshop) может потребовать много времени и не привести к успеху. Более того, при этом никогда нет уверенности, что подобранный вариант близок к оптимальному.

Настоящая работа посвящена указанным двум проблемам. Во-первых, развивается предложенный одним из авторов в [9] подход к параметризации алгоритмов обработки изображений, основанный на использовании модели одномерного частотного отклика в виде отрезков квадратичной и экспоненциальной функций. Далее для краткости этот фильтр будем называть фильтром с квадратично-экспоненциальной характеристикой, в английской транскрипции (*Square Exponential Response (SER) - Filter*). Кроме того, в настоящей работе строится технология настройки параметров КЭХ-фильтра, которая либо полностью исключает подбор параметров фильтра вручную, либо сводит число попыток к минимуму. Соответствующее программное

обеспечение может использоваться в сети Интернет для удаленной обработки изображений, зарегистрированных с помощью мобильных устройств:

## 2. Метод

Для снижения вычислительной сложности алгоритма обработки изображений будем строить фильтр в предположении радиальной симметрии искажений. Поэтому зададим опорную область в виде  $N \times N$ -квадрата с центром в точке  $k_1 = 0, k_2 = 0$  ( $N$  – нечетно) [1], [4]. В общем случае, если фильтр обладает опорной областью  $D$ :

$$\{D(n_1, n_2) : 0 \leq n_1 < N, 0 \leq n_2 < N\}$$

отсчеты изображения  $y(n_1, n_2)$ , восстановленного с помощью КИХ-фильтра, можно определить по отсчетам  $x(n_1, n_2) \in D$  искаженного изображения в соответствии с соотношением [9]

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

где  $h(k_1, k_2)$  – двумерная импульсная характеристика. С учетом предположения о радиальной симметрии искажений соотношение для вычисления отсчетов 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  $r_i$ . На рис. 1 приведена схема формирования  $y(n_1, n_2)$  по отсчетам  $x(n_1, n_2)$  из опорной области  $7 \times 7$  в предположении радиальной симметрии искажений.

Предположение о радиальной симметрии искажений позволяет нам рассматривать двумерную частотную характеристику как результат «вращения» одномерной частотной характеристики, заданной в радиальном направлении на интервале  $[0, \infty)$ . Следуя работе [9], для описания одномерного частотного отклика в радиальном направлении воспользуемся моделью *SER* – фильтра:

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

$$S(\omega^*) = a\omega^{*2} = e^{-c\omega^*} \quad (3)$$

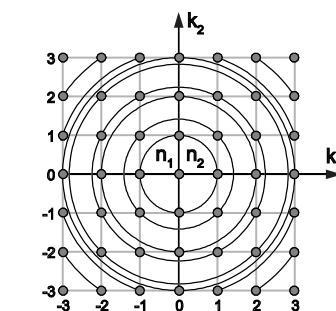


Рис. 1. Пример опорной области  $7 \times 7$

Функция (2) состоит из отрезков параболы в диапазоне частот  $|\omega| \leq \omega^*$  и убывающей экспоненты – при  $|\omega| > \omega^*$ , а ординаты этих отрезков функций совпадают 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.

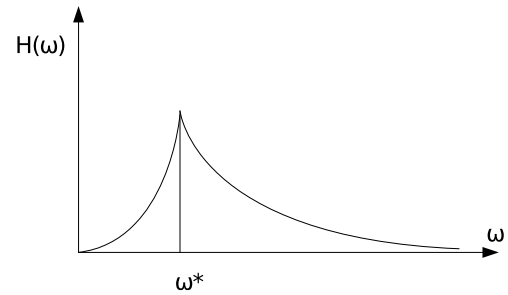


Рис. 2. Типичный вид графика спектра фильтра

Соответствующий этой спектральной характеристике импульсный отклик зависит от пространственного параметра  $r$ , являющегося расстоянием от центра опорной области. Воспользуемся, полученными в работе [9], соотношениями для вычисления одномерного импульсного отклика на расстоянии  $r$  от центра опорной области:

$$h(r) = \frac{e^{-c\omega^*}}{\pi} \left[ \frac{\sin \omega^* r}{r} + \frac{2 \cos \omega^* r}{r^2 \omega} - \frac{2 \sin \omega^* r}{r^3 \omega^2} + \frac{(c \cos(\omega^* r) - r \sin(\omega^* r))}{c^2 + r^2} \right] \quad (4)$$

и в центре опорной области:

$$h(0) = \left( (\omega^* c + 3) / 3c\pi \right) e^{-c\omega^*}. \quad (5)$$

Из приведенных соотношений видно, что определение одномерного импульсного отклика  $h(r)$  сводится к настройке двух параметров:  $\omega^*$  и  $c$ , что и является предметом задачи идентификации модели фильтра по прецедентам. Мы рассмотрим решение этой задачи, как для случая заданных тестовых изображений, так и в случае их отсутствия.

Если параметры  $\omega^*$  и  $c$  каким-либо образом определены, отсчеты двумерного импульсного отклика могут быть получены путем дискретизации непрерывной функции (4) для всех возможных направлений, при которых имеет место пересечение соответствующих лучей с точками (отсчетами) опорной области. Нетрудно заметить, что для формирования конкретного отсчета вследствие радиальной симметрии искажений достаточно вычислить расстояние этого отсчета от центра опорной области.

### 3. Схемы настройки фильтра

Рассмотрим два варианта настройки параметров фильтра. Вначале рассмотрим случай, когда заданы прецеденты, т.е. неискаженное изображение того же самого сюжета. Как указывалось выше, они могут формироваться путем «компьютерного ретуширования» небольших фрагментов исходного искаженного изображения. Например, путем восстановления резкой границы между ярко освещенными плоскими объектами и отбрасываемой ими тенью.

Обычно достаточно создания нескольких небольших фрагментов в разных частях изображения с разными направлениями границ. Такая технология рассматривалась в работах [7], [8].

Схема настройки параметров фильтра для рассматриваемого случая приведена на рисунке 3. Здесь в блоке 1 на каждой итерации в соответствии с заданным правилом формируются параметры  $\omega^*$ ,  $c$  и вычисляются  $h(r)$ ,  $h(0)$  по соотношениям (4), (5). В блоке 2 в силу функции  $h(r)$  для каждого отсчета на расстоянии  $r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$  от центра опорной области определяется значение импульсного отклика. В результате формируется двумерный импульсный отклик. В блоке 3 с использованием полученного двумерного импульсного отклика осуществляется обработка искаженного изображения. Далее в блоке 4 восстановленное изображение сравнивается с тестовым и вычисляется критерий качества восстановления:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX^2}{MSE} \right), \quad (6)$$

где  $MAX$  – максимальное значение, принимаемое пикселем изображения, а  $MSE$  – среднеквадратическая ошибка (СКО) восстановления.

Если полученное значение критерия качества не достигает заданного порогового значения, описанные выше этапы настройки фильтра повторяются, иначе выводится восстановленное изображение.

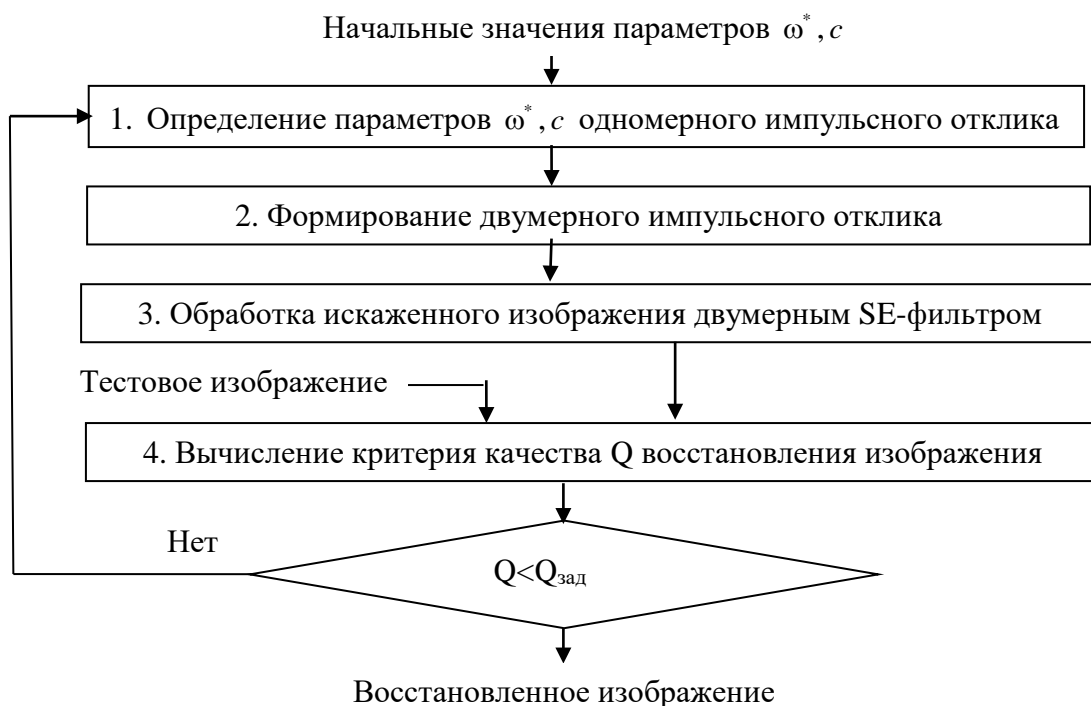


Рис. 3. Схема настройки параметров фильтра

Описанная схема легко автоматизируется. Наиболее сложным для автоматизации является поиск и «компьютерное ретуширование» фрагментов для обучения фильтра. [7], [8]. Технология, одним из этапов которой является

(даже частично автоматизированное) «компьютерное ретуширование» фрагментов изображений, все-таки, создает определенные трудности и вряд ли вызовет большой интерес пользователей Интернет-сетей. Поэтому наша следующая задача состоит в том, чтобы построить схему настройки параметров фильтра для улучшения качества изображений при отсутствии эталонных образцов.

В описанной выше схеме в соответствии с (6), чем точнее в процессе обработки изображения воспроизводится тестовое изображение, тем больше значение PSNR. Поэтому приведенная на рисунке 3 схема оптимизации параметров восстанавливающего фильтра заключается в отборе и сохранении параметров  $\omega^*$  и  $c$ , приводящих к увеличению PSNR при сравнении обработанного изображения с эталонным. Если эталонное изображение отсутствует, обработанное изображение можно сравнивать только с исходным искаженным. Но при этом отбор параметров  $\omega^*$  и  $c$ , приводящих к улучшению качества изображения, может сопровождаться лишь уменьшением PSNR. Однако при уменьшении значения PSNR качество полученного изображения может быть, как выше, так и ниже.

Для установления факта улучшения качества изображения при уменьшении PSNR будем использовать дополнительный признак, характеризующий средний контраст на обработанном изображении. Основанием для этого является тот факт, что коррекция динамических искажений (смаза и дефокусировки) приводит к подчеркиванию контуров. Простейшей характеристикой среднего контраста изображения является дисперсия  $D(X)$ , подсчитанная по всему изображению. Таким образом, критерий настройки параметров КИХ-фильтра может заключаться в отборе таких параметров  $\omega^*$  и  $c$ , при которых PSNR при сравнении с исходным (искаженным) изображением уменьшается, а дисперсия обработанного изображения -  $D(\hat{X})$  увеличивается.

Кроме того, значения PSNR должны быть ограничены снизу, поскольку при его малых значениях возможны значительные искажения, характеризующиеся высоким контрастом. Поэтому минимально допустимое значение PSNR должно быть достаточно высоким. Это означает, что работоспособность описанного критерия возможна лишь в достаточно узком диапазоне значений PSNR, определяемых по исходному искаженному и обработанному изображениям.

В соответствии с приведенным выше содержательным описанием, математически критерий формулируется следующим образом. Ставится задача найти:

$$\hat{\omega}^*, \hat{c}, \hat{k}: \quad PSNR(X, \hat{X}(\hat{\omega}^*, \hat{c}, \hat{k})) = \min_{\omega^*, c, k} PSNR(X, \hat{X}(\omega^*, c, k)) \quad (10)$$

При условии:  $D(\hat{X}) > D(X)$ ,

$$PSNR(X, \hat{X}(\hat{\omega}^*, \hat{c})) > PSNR_{\text{дон}}.$$

Схема настройки параметров фильтра в соответствии с описанным выше критерием остается такой же, как показано на рис. 3. В отличие от предыдущего случая критерий качества восстановления в блоке (4) вычисляется в соответствии с (10). Подчеркнем еще раз, что при этом не используется тестовое изображение.

#### 4. Примеры восстановления

Настройка параметров  $\omega^*$  и  $c$  фильтра осуществлялась с использованием тестового изображения «Лена», приведенного на рис. 4а. Искажения вносились путем моделирования фильтра Гаусса нижних частот для двух вариантов  $\sigma$ , соответствующих разной степени размытия:  $\sigma=3$  и  $\sigma=5$ . На рис. 4 б, в приведены те же изображения после внесения искажений с указанными параметрами размытия.

На рисунках 5 приведены восстановленные изображения в оттенках серого. Здесь а, б – изображения полученные восстановлением изображений со степенью размытия  $\sigma=3$  и  $\sigma=5$  с помощью фильтра, который настраивался по исходному изображению, приведенному на рис. 4, а. На рисунке 5, в приведено изображение, полученное путем восстановления изображения, размытого с параметром  $\sigma=3$ , фильтром, настроенным без тестового изображения по критерию (10).



Рис. 4. Изображения «Лена»: неискаженное – а) искаженные с размытием  $\sigma=3$  б),  $\sigma=5$  – в)



Рис. 5. Обработанные изображения «Лена»: по эталону  $\sigma=3$  – а),  $\sigma=5$  – б); без эталона,  $\sigma=3$  – в)



Визуально полученные изображения воспринимаются как достаточно качественные. При этом были достигнуты следующие объективные значения критерия качества. При настройке с эталоном: для размытия с параметром  $\sigma=3$  PSNR=30.41, для размытия с  $\sigma=5$  PSNR=27.18. При настройке без эталона для размытия с  $\sigma=3$  PSNR=26.83 (при сравнении восстановленного с исходным).

Предлагаемый критерий и технология без существенных дополнений может применяться также и для улучшения резкости цветных изображений. Для этого целесообразно использовать представление изображений в цветовом пространстве Lab. Известно, что в этом цветовом пространстве за искажения типа расфокусировки «отвечает» компонента L. При этом технология должна включать следующие этапы: переход от RGB к Lab (1), обработка L-компонента с использованием описанного выше алгоритма (2), обратный переход к RGB-изображению для обычного отображения. На рис. 6 а-г приведены результаты обработки цветных изображений при разной степени размытия.



Рис. 5. Исходные искаженные изображения «Лена»:  $\sigma=3$  – а),  $\sigma=5$  – б); обработанные  $\sigma=3$  – в),  $\sigma=5$  – г)

В данном случае значения критерия качества PSNR для L-компонента при размытии с параметром  $\sigma=3$  составило 31.5, а для размытия с  $\sigma=5$  PSNR=28.91.

## 5. Организация сервиса в сети Интернет

Простота применяемых критериев и схем настройки КИХ-фильтров открывает широкие возможности для их использования для коррекции изображений, регистрируемых малогабаритными мобильными устройствами. Для использования описанной выше технологии коррекции изображений на мобильных устройствах предлагается реализация следующего двухзвенного клиент-серверного приложения (рисунок 6).

Предполагается, что собственно коррекция изображений осуществляется на удаленном сервере. Для реализации удаленного сервера может использоваться CUBA Platform [10]. CUBA Platform это высокоуровневая платформа для создания бизнес-приложений на Java, объединяющая ведущие open-source технологии в эффективную среду разработки. Основной функционал данной технологии заключается в создании приложений, обслуживающих бизнес-процессы предприятий, однако высокая надежность,

скорость работы и масштабируемость платформы позволяет эффективно реализовать и «непрофильные» сервисы, например, инструменты для удаленной обработки изображений. Несмотря на высокий уровень абстракции, платформа является максимально открытым и удобным для разработчика фреймворком. Код платформы полностью открыт, а любые ее компоненты могут быть переопределены с помощью специального механизма расширений.



Рис. 6. Схема клиент-серверного приложения

Таким образом, для успешной реализации описанного метода коррекции изображений потребуется разработка специального модуля-расширения, в котором непосредственно будет происходить обработка. При этом все прочие составляющие клиент-серверного приложения – система запросов, веб-интерфейс, сервер базы данных, облачная реализация и т.п. – могут быть созданы при помощи встроенных в CUBA Platform инструментов.

### **Заключение**

Предложенные схемы настройки параметризованного КИХ-фильтра, обладающего вычислительной простотой, открывают широкие возможности для реализации этой технологии в сети Интернет. Особую привлекательность для пользователей может иметь схема настройки без эталонного изображения. Для реализации, внедрения и коммерциализации этой технологии, потребуется привлечение ресурсов IT-компаний, например, компании Haulmont, которая является крупным отечественным разработчиком ПО, в том числе CUBA Platform.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 17-29-03112, № 16-07-00729-а.

## Литература

1. Wenbin Ye, Ya Jun Yu. Greedy Algorithm for the Design of Linear-Phase FIR Filters with Sparse Coefficients / Circuits Syst Signal Process [link.springer.com/article/10.1007/s00034-015-0122-5](http://link.springer.com/article/10.1007/s00034-015-0122-5) - (2016) 35: 1427. doi:10.1007/s00034-015-0122-5
2. Computer Image Processing, Part II: Methods and algorithms (Chapter 10: Estimation by a small number of observations.)/ edited by Victor A. Soifer // VDM Verlag . – 2009. – 584 P.
3. Д.И. Зимин, В.А. Фурсов, С.Б. Попов Интернет технология обработки цветных изображений // Труды Всероссийской конференции "Научный сервис в сети Интернет: технологии распределенных вычислений", г. Новороссийск, 19-24 сентября 2005, стр. 26-28.
4. Д.И. Зимин, В.А. Фурсов. Распределенная обработка большеформатных изображений в цветовом пространстве HSL // Тр. Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: технологии параллельного программирования». Новороссийск, 18-23 октября 2006 г., с. 64-67.
5. V. A. Fursov. Correction of distortions in color images based on parametric identification / V. A. Fursov, A. V. Nikonorov, S. A. Bibikov, P. Yu. Yakimov and E. Yu. Minaev. Pattern recognition and Image Analysis, Vol. 21, No.2, - Pleyades Publishing, Ltd., 2011. DOI: 10.1134/S1054661811020349, Plenary Papers, P. 125-128.
6. Shcherbakov MA, Panov AP. Nonlinear filtering with adaptation to local properties of the image [In Russian]. Computer Optics 2014; 38(4): 818 – 824.
7. А.В. Никоноров, М.Г. Милюткин, В.А. Фурсов. Параллельная реализация двумерных БИХ-фильтров в распределенной системе обработки изображений. Сб. трудов международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии' 2010», г.Уфа, (УГАТУ), 29 марта – 2 апреля 2010 г., Издательский центр ЮУрГУ, Челябинск. С. 268–275.
8. Сергеев В.В., Фурсов В.А., Парфенов С.И. Оценка разрешающей способности видеотракта по фрагментам регистрируемых изображений. Автометрия, № 5, 2001. С. 25-36.
9. 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.
10. Cuba-platform.com, (2015). Explore Features | CUBA.platform. [Электронный ресурс] // <https://www.cuba-platform.com/features> (дата обращения апрель 2017).