

Технология коррекции динамических искажений на мобильных устройствах

Э.Ф.Фатхутдинова¹, В.А.Фурсов^{1,2}

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

²Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе рассматривается технология настройки фильтра для коррекции динамических искажений при отсутствии обучающего изображения. Основная цель работы – создание программы, реализуемой на мобильных устройствах. Приводятся алгоритм, псевдокод программы и результаты экспериментов на мобильных устройствах, иллюстрирующие эффективность предложенного подхода.

1. Введение

Одним из перспективных направлений на сегодняшний день является мобильная разработка. Число владельцев смартфонов по всему миру с каждым днём растёт. Музыка, работа с фотографиями, социальные сети – самые популярные типы приложений среди владельцев смартфонов [1]. Мы рассмотрим одну из наиболее популярных функций мобильных устройств – регистрацию изображений. Основной причиной массового использования этой функции является возможность оперативной регистрации изображений в неожиданных и уникальных ситуациях. При этом часто приходится сталкиваться с проблемами размытия изображения (вследствие расфокусировки) и/или смаза (при быстром перемещении регистрируемого объекта относительно камеры). Искажения типа смаза и расфокусировки обычно называют динамическими. Задача коррекции динамических искажений на изображениях, регистрируемых мобильными устройствами, с помощью реализованных непосредственно в самом мобильном устройстве алгоритмов цифровой обработки изображений является крайне актуальной.

Наиболее широко для коррекции динамических искажений используются цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Важнейшим аргументом в их пользу, по сравнению с БИХ-фильтрами (с бесконечной импульсной характеристикой) является то, что они всегда физически реализуемы и устойчивы [2]. Наиболее популярными подходами к построению КИХ-фильтров являются инверсная и винеровская фильтрация. При построении инверсного фильтра часто приходится сталкиваться с тем, что обратный оператор не существует или соответствующая передаточная функция имеет полюса близкие к нулю [3]. При этом на восстановленном изображении происходит подчеркивание шумов. В случае винеровского фильтра

предполагается, что это должно преодолеваться за счет учета в передаточной функции фильтра частотных характеристик шума [4]. Однако в действительности эти характеристики обычно отсутствуют, и синтез оптимального винеровского фильтра в условиях априорной неопределенности становится самостоятельной проблемой. Известно много различных модификаций КИХ-фильтров [5], [6]. Однако все они сталкиваются с одной из указанных проблем или с некоторой их комбинацией, в зависимости от того на что направлена модификация.

В настоящей работе используется подход, основанный на решении задачи параметрической идентификации фильтра по прецедентам [7]. В рамках этого подхода предполагается заданным параметрический класс моделей фильтра, а параметры восстанавливающего фильтра определяются по заданному тестовому (эталонному) и исходному искаженному изображениям. В результате идентификации параметры фильтра подбираются с учетом реальных помех [7] на искаженном изображении, что в значительной степени снимает проблемы инверсного и винеровского фильтров. Однако проблема состоит в том, что эталонное изображение обычно не известно. В работе [8] рассматривалась технология формирования тестовых эталонных фрагментов из самого искаженного изображения. Эта технология в общем случае позволяет преодолеть проблему отсутствия эталонов. Однако пользователь мобильного прибора вряд ли будет создавать тестовый фрагмент для обработки изображений на мобильном устройстве, даже если фрагмент имеет малые размеры.

В работе [9] предложен метод коррекции динамических искажений, основанный на параметрическом подходе. Однако в отличие от известных подходов в этом методе не используются эталонные изображения. В данном случае фактически идентификация по прецедентам отсутствует. А настройка параметров модели фильтра осуществляется по косвенным признакам. Настоящая работа посвящена программной реализации этого подхода на реальных мобильных приборах. В частности, приводится разработанный псевдокод и результаты экспериментов.

2. Постановка задачи

Используется подход, основанный на использовании модели фильтра с квадратично-экспоненциальной характеристикой одномерного частотного отклика в виде отрезков квадратичной и экспоненциальной функций – *Square Exponential (SE-Filter)* [7]. SE-фильтр строится в предположении радиальной симметрии искажений с опорной областью D :

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

в виде $N \times N$ -квадрата с центром в точке $k_1 = 0, k_2 = 0$ (N – нечетно) [3, 5]. Отсчеты изображения, восстановленного с помощью SE-фильтра – $y(n_1, n_2)$, определяются по отсчетам $x(n_1, n_2) \in D$ искаженного изображения в соответствии с соотношением [10]:

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

где

$$x(r_i) = \frac{1}{n(r_i)} \sum_{j=1}^{N(r_i)} x_j(r_i), (2)$$

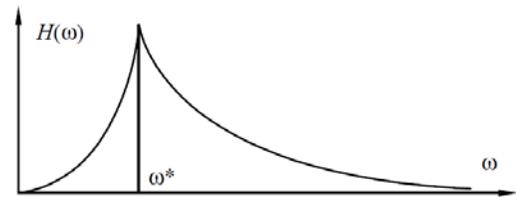


Рисунок 1. Типичный вид(1) графика спектра фильтра.

$h(r_i)$ - одномерная импульсная характеристика, зависящая от радиуса r_i , а $n(r_i)$ – число отсчетов, попавших на окружность радиуса r_i . На рисунке 2 приведена схема формирования $y(n_1, n_2)$ по отсчетам $x(n_1, n_2)$ из опорной области 7×7 в предположении радиальной симметрии искажений.

Одномерный частотный отклик в радиальном направлении описывается соотношениями [11]:

$$S(\omega) = \begin{cases} a\omega^2, & \text{при } |\omega| \leq \omega^*, \\ e^{-c|\omega|}, & \text{при } |\omega| > \omega^*, \end{cases} \quad (3)$$

$$S(\omega^*) = a\omega^{*2} = e^{-c\omega^*}. \quad (4)$$

Соответствующий этой спектральной характеристике импульсный отклик зависит от пространственного параметра r , являющегося расстоянием от центра опорной области. Соотношение для вычисления одномерного импульсного отклика на расстоянии r от центра опорной области имеет вид [13]:

$$h(r) = \frac{e^{-c\omega^*}}{\pi} \left[\frac{\sin \omega^* r}{r} + \frac{2 \cos \omega^* r}{r^2 \omega} - \frac{2 \sin \omega^* r}{r^3 \omega^2} + \frac{(c \cos(\omega^* r) - r \sin(\omega^* r))}{c^2 + r^2} \right] \quad (5)$$

Из (5) видно, что импульсный отклик $h(r)$ определяется параметрами ω^* и c . Если они определены, отсчеты двумерного импульсного отклика определяются путем дискретизации непрерывной функции (5) для всех возможных направлений. Для формирования конкретного отсчета достаточно вычислить расстояние этого отсчета от центра опорной области.

В настоящей работе опираясь на приведенное описание параметрической модели SE-фильтра мы построим технологию определения параметров фильтра без задания эталонного изображения. Общую схему и алгоритмы определения параметров приведенной модели фильтра мы опишем в разделе 3. В подразделе 3.3 приведем реализующий эту схему программный код, а в заключительном разделе 4 – результаты испытаний с использованием мобильного устройства.

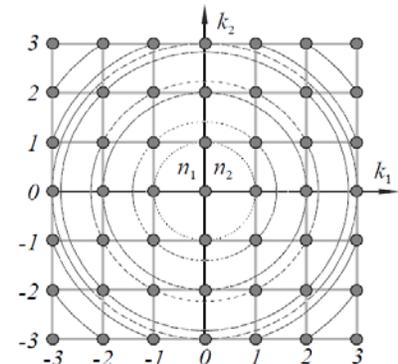


Рисунок 2. Пример опорной области 7×7 .

3. Метод

3.1 Описание алгоритма настройки

В этом разделе мы приведем детальное описание алгоритма и приведем реализующий его псевдокод для настройки параметров SE-фильтра без эталона. При отсутствии эталона текущее обработанное изображение может сравниваться только с исходным искаженным. Для количественной оценки их различия мы будем использовать критерий PSNR(peak signal-to-noise ratio) – пиковое отношение сигнала к шуму:

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

где MAX – максимальное значение, принимаемое пикселем изображения, а MSE – среднеквадратическая ошибка (СКО) восстановления. В отличие от настройки по эталону в данном

случае улучшение качества восстановленного изображения сопровождается увеличением различий с исходным искаженным изображением. Это означает, что отбор параметров ω^* и c , приводящих к улучшению качества изображения, может сопровождаться лишь уменьшением PSNR.

Поскольку при уменьшении значения PSNR качество полученного изображения может быть, как выше, так и ниже, используется дополнительное условие: увеличение дисперсии обработанного изображения $-D(\hat{X})$. Это требование обеспечивает последовательное увеличение среднего контраста, которое обычно наблюдается при увеличении резкости изображения. Кроме того, вводится ограничение на минимально допустимое значение PSNR, поскольку при его малых значениях возможны значительные искажения, характеризующиеся высоким контрастом.

Таким образом, ставится задача найти:

$$\hat{\omega}^*, \hat{c}, \hat{k}: \quad PSNR(X, \hat{X}(\hat{\omega}^*, \hat{c}, \hat{k})) = \min_{\omega^*, c, k} PSNR(X, \hat{X}(\omega^*, c, k)) \quad (7)$$

При условиях [9]:

$$D(\hat{X}) > D(X), \quad (8)$$

$$PSNR(X, \hat{X}(\hat{\omega}^*, \hat{c})) > PSNR_{don}. \quad (9)$$

Основные этапы алгоритма, реализующего описанный метод настройки – следующие: Задание начальных значений ω^* и c , Определение параметров одномерного импульсного отклика ω_x^* , ω_y^* , c_x , c_y , Формирование двумерного импульсного отклика $h(\omega_x^*, \omega_y^*, c_x, c_y)$, Обработка искаженного изображения двумерным SE-фильтром (получение \hat{X}), Вычисление параметров $PSNR(\hat{X}, X)$, $D(X)$, $D(\hat{X})$, проверка условий (8),(9).

3.2 Особенности реализации на мобильном устройстве

Часто при реализации алгоритмов обработки изображений используют библиотеку OpenCV. OpenCV – это мощная кроссплатформенная библиотека с открытым исходным кодом под лицензией BSD, является свободной для использования в коммерческих и академических целях. Написана на C/C++ и использует параллельность и многоядерность для выполняемых задач. Поддерживаются языки C/C++, Python, Java на платформах Windows, Linux, Mac.

Однако, на мобильных устройствах, в частности, на платформе Android, такого рода библиотек не имеется. Чтобы оптимизировать код и увеличить производительность, внедряют стороннюю библиотеку. Для этого используется готовый набор AndroidNDK, который позволяет реализовывать приложения, используя такие языки как C/C++. Это обертка, которая позволяет с помощью механизма JNI обращаться к функциям OpenCV, написанным на языке C++. Код библиотеки в этом случае называется нативным (native), поскольку он не может быть выполнен на виртуальной машине и компилируется непосредственно в машинный код требуемой процессорной архитектуры.

Так как мы работаем с ограниченным количеством памяти, логично загружать память изображение только с более низким разрешением. Версия с уменьшенным разрешением должна соответствовать размеру компонента пользовательского интерфейса, который его отображает. Изображение с высоким разрешением занимает большое количество памяти и не обеспечивает видимого преимущества при отображении. Выбор варианта может осуществляться пользователем с учетом характеристик конкретного мобильного устройства. На рисунке 3 приведен псевдокод программы, реализующий описанный в разделе 3.1 алгоритм, написанный с учетом особенностей программирования на мобильных устройствах.

3.3 Псевдокод программы

```

Начало
для w ∈ (w_In, End_w) / c ∈ (c_In, End_c) с шагом Step_w / Step_c выполнить
  начало функция 1
  для i ∈ (1, N) с шагом 1 выполнить
    для j ∈ (1, N) до с шагом 1 выполнить
      
$$r = \left| \sqrt{\left(i - \frac{N+1}{2}\right)^2 + \left(j - \frac{N+1}{2}\right)^2} \right|$$

      если r > 0,5 то
        
$$h(i, j) = \frac{\exp(i-c\omega)}{\pi} \left( \frac{\sin \omega r}{r} + \frac{2 \cos \omega r}{r^2 \omega} - \frac{2 \sin \omega r}{r^3 \omega^2} + \left( \frac{c \cos \omega r - r \sin \omega r}{c^2 + r^2} \right) \right)$$

        конец
      конец
    конец
  конец
  начало функция 2
  для i ∈ (1, N) с шагом 1 выполнить
    для j ∈ (1, N) до 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
  Ввод: минимальное значение PSNR
  Новое значение PSNR = psnr(XR, X, 1)
  если Вычисленное значение PSNR < Предыдущего значения PSNR и
  дисперсия обработанного изображения (XR) > дисперсия искаженного
  изображения (X) то
    запоминаем значение параметра w/c
    запоминаем значение PSNR
  конец
  Вызываем функция 1 и функция 2 с новыми параметрами w и c
  Вывод: обработанное изображение.
  Конец

```

Рисунок 3. Псевдокод программы.

4. Результаты экспериментов

На рисунке 4 представлен результат работы фильтра с настроенными параметрами ω и c . На рисунке 4(а) приведен пример искаженного полутонного изображения с помощью моделирования фильтра Гаусса нижних частот со степенью размытия: $\sigma=5$. На рисунке 4(б) приведено восстановленное изображение с помощью фильтра, настроенного без эталонного изображения, при размерности опорной области, равной 7×7 . Качественный результат, достигнутый при восстановлении, $PSNR = 37,66$.

Данный алгоритм восстановления изображения без использования эталонного также может применяться и для цветных изображений. Для этого осуществляется переход от RGB-представления в Lab-пространство. Далее осуществляются обработка L-компонента в соответствии с описанным выше программным кодом и обратный переход к RGB-изображению.



Рисунок 4. Изображения «Лена»: (а) – искаженное с размытием $\sigma=5$, (б) – обработанное.

5. Заключение

Реализован метод коррекции динамических искажений, основанный на «слепой» идентификации параметров восстанавливающего фильтра, не требующей задания эталонного изображения. Разработана программа на платформе Android, предназначенная для обработки изображений в мобильных устройствах. Результаты работы могут быть востребованы широким кругом пользователей планшетов и смартфонов.

6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26).

7. Литература

- [1] Mail.RuGroup, Мобильный Интернет в России.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://corp.ingmail.ru/media/files/40314-researchmobilemail.pdf>[10.11.2017].
- [2] Wenbin, Y. Greedy Algorithm for the Design of Linear-Phase FIR Filters with Sparse Coefficients / Y.Wenbin, Y.J. Yu. // Circuits Syst Signal Process. – 2016. Vol. 35. – P. 1427. DOI:10.1007/s00034-015-0122-5.
- [3] 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.
- [4] Прэтт, У. Цифровая обработка изображений. Кн.2. / У. Прэтт// М.: Мир. – 1982. – 480 С.
- [5] Moreno, C. Constructing FIR Digital Filters with valarray / C. Moreno, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mochima.com/articles/FIR/FIR.html>.
- [6] Wenbin, Ye. Greedy Algorithm for the Design of Linear-Phase FIR Filters with Sparse Coefficients / Y.Wenbin, Y.J. Yu // Circuits Syst Signal Process. – 2016. – Vol. 35. – P. 1427. DOI:10.1007/s00034-015-0122-5.
- [7] 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.
- [8] Fursov, V.A. Constructing unified identification algorithms using a small number of observations for adaptive control and navigation systems / V.A. Fursov // Journal: Proc. SPIE, Scott A. Speigle. – 1997. – Vol. 3087. – P. 34-44.
- [9] Фурсов В.А. Интернет-технология коррекции динамических искажений на изображениях в мобильных устройствах / В.А. Фурсов, П.Ю. Якимов // Труды конференции «Научный сервис в сети интернет», Новороссийск, 18-23 сентября, 2017.

- [10] Дэн, Э. Цифровая обработка многомерных сигналов / Э. Дэн, М. Рассел.– М.: Мир, 1988.
- [11] Shcherbakov, M.A. Nonlinear filtering with adaptation to local properties of the image / M.A. Shcherbakov, A.P. Panov // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 818-824.

The technology of correction of dynamic distortions on mobile devices

E.F. Fatkhutdinova¹, V.A.Fursov²

¹Samara National Research University, Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086

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

Abstract. We consider the filtration technology for correcting dynamic distortions in the absence of training images. The main purpose of the work is the creation of programs implemented on mobile devices. The algorithm, the pseudocode of the program and the results of experiments on mobile devices illustrating the effectiveness of the proposed approach are given.

Keywords: FIR filter, impulse response, image processing, mobile device.