

УДК 621.369

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДА И ПАРАМЕТРОВ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИИ

А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
РАН, 141120, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2018 г.

**Аннотация.** В статье предлагается принципиально новый подход к решению задач восстановления искажённых изображений. Если традиционно исследователи пытаются реконструировать неизвестную аппаратную функцию (АФ) по каким либо методикам либо, при итерационных подходах, сделать начальные предположения о виде АФ, то мы опираемся на универсальный опорный спектр (УОС), т.е. на знание того, каким, в среднем, должен быть амплитудный пространственный спектр неискажённого изображения. Если амплитудный спектр АФ искажения знакопеременный, то использование метода перенормировки с ограничением (МПО) с классическим УОС не приводит к успешному восстановлению. В этой связи предлагается провести процедуру адаптации УОС и дополнить её автоматическим учётом знака. В результате такой методологии предложена модель нормированного на УОС усреднённого спектра изображения (УНС). Заметим что происходит автоматическое изменение формы универсального опорного спектра, а не реконструкция аппаратной функции искажения. Таким образом, предлагаемые в нашей работе модификация и адаптация УОС, в зависимости от конкретной задачи, повышают эффективность процедур восстановления искажённых изображений и проходят в автоматическом режиме.

**Ключевые слова:** слепая деконволюция, универсальный опорный спектр, метод перенормировки с ограничением.

**Abstract.** The article offers a fundamentally new approach to solving the problems of reconstructing distorted images. If traditionally researchers try to reconstruct an unknown Point Spread Function (PSF) by some methods or, with iterative approaches, to make initial assumption about the form of PSF, then we rely on the General-purpose reference spectrum (GRS), i.e. on the knowledge of what, on average, there should be an amplitude spatial spectrum of an undistorted image. If the amplitude spectrum of the PSF distortion is alternating, then the use of the method of renormalization limitedthe (MRL) with classical GRS does not lead to a successful reconstruction. In connection with this, it is proposed to carry out the adaptation procedure for the GRS and to supply it with the automatic registration of the sign. As a result of such a methodology, a model of the normalized image of the adaptive General-purpose reference spectrum (AGRS) is proposed. Note that there is an automatic change in the form of the General-purpose reference spectrum, and not a reconstruction of the Point Spread Function. Thus, the modifications and adaptations of the GRS proposed in our work, depending on the specific task, increase the efficiency of the procedures for reconstructing the distorted images and can be done automatically.

**Key words:** blind deconvolution, general-purpose reference spectrum, the method of renormalization limited.

## 1. Введение

Дефокусировка является одной из основных проблем, возникающих при работе с реальными изображениями. Поэтому актуальными являются исследования, позволяющие усовершенствовать методы обработки таких искажений.

При восстановлении изображений, как правило, конструируется модель аппаратной функции (АФ) которая в той или иной степени описывает искажения. Затем оцениваются параметры этой АФ. На заключительном этапе известными обратными процедурами производится реконструкция изображения. Общепринятыми методами восстановления являются

использование частотных фильтров, созданных на основе неких критериев оптимальности, учитывающих наличие шума. Это, например, Фильтр Винера (ФВ) (фильтр минимального среднеквадратического отклонения) или фильтрация по Тихонову (основанной на минимизации сглаживающего функционала со связью) [1 - 3]. Помимо линейных «прямых» методов, использующих построенный (сконструированный) фильтр, существуют нелинейные методы. Например - алгоритм Люси-Ричардсона (итерационного нелинейного восстановления), использующий метод максимального правдоподобия, для которого предполагается, что изображение подчиняется распределению Пуассона. Такой подход требует больших вычислительных ресурсов и определённых гарантий сходимости (предсказуемости поведения) [1 - 3].

В случае неизвестной аппаратной функции используют так называемую «слепую деконволюцию», которая итерационными приближениями проводит реконструкцию ядра размытия АФ по максимуму правдоподобия. Выбирается первое приближение АФ, далее по выбранному известному методу делается деконволюция, после чего по некоторым критериям определяется уровень качества, на этой основе уточняется аппаратная функция, и итерация повторяется до достижения нужного результата. Это направление - чрезвычайно актуальная тема, и этому посвящён ряд интересных исследований, например [4 - 6].

Нами предлагается принципиально новый подход к решению задач восстановления искажённых изображений. Если традиционно исследователи пытаются реконструировать неизвестную АФ по каким либо методикам, либо, при итерационных подходах, сделать начальное предположения о виде АФ, то мы опираемся на знание того, каким, в среднем, должен быть амплитудный пространственный спектр неискажённого изображения. В наших предыдущих исследованиях было установлено, что амплитудный пространственный спектр неискажённых изображений можно условно разделить на аксиально-симметричную (изотропную) и анизотропную части. В этой связи была

предложена эмпирическая модель изотропной составляющей амплитудного спектра, которая получила название «универсальный опорный спектр» (УОС) [7].

Модель УОС можно эффективно использовать при решении разнообразных практических задач. Например: для нахождения аппаратной функции (АФ) искажения, так же слепого восстановления изображений, искажённых линейным смазом и дефокусировкой, при неизвестной форме и параметрах АФ (если спектр АФ неотрицателен) [8, 9]; для модификации фильтра Винера (ФВ) (оценки отношения шум – сигнал в фильтре Винера), что позволяет восстанавливать изображение с неизвестными аддитивными шумами и помехами [10, 11]; в методе перенормировки с ограничением (МПО) для восстановления изображений, искажённых известной аппаратной функцией, при наличии неизвестных помех и шума [12]; для прогнозирования возможного улучшения качества искажённых изображений [13, 14]; для фильтрации спектрально-локальных помех с помощью методов опорного изображения (МОИ) и перенормировки с ограничением (МПО) [15, 16]; для восстановления изображений, искажённых аппаратной функцией с неизвестными боковыми лепестками, и при перенормировке спектра для восстановления изображений, искажённых гидрометеорами и аппаратной функцией с неизвестными параметрами [17].

В предлагаемом нами подходе при восстановлении изображений ни вид АФ, ни её параметры не оцениваются. Предполагается, что АФ искажения неизвестна. В этом случае для использования в методе перенормировки с ограничением производится адаптация УОС на основе информации, извлечённой из спектра исходного обрабатываемого искажённого изображения.

## 2. Постановка задачи и ее решение

Искажённое изображение, АФ и неискаженное изображение связаны уравнением свертки [1], которое в спектральном представлении выглядит так [1]

$$J(\vec{f}) = A(\vec{f})J_0(\vec{f}) \quad (1)$$

где  $J_0(\vec{f})$  и  $J(\vec{f})$  - соответственно спектры неискаженного и искажённого изображения,  $A(\vec{f})$  - спектр АФ,  $\vec{f}$  - вектор пространственной частоты. Стандартное решение для  $J_0(\vec{f})$  путём деления обеих частей (1) на спектр АФ нам не подходит, поскольку мы его (спектр АФ) не знаем. Однако нам известно, что спектр АФ – вещественная функция и, следовательно, искажение спектра изображения происходит как при изменении модуля спектра неискаженного изображения, так и при изменении знака спектра неискаженного изображения (НИ).

Дальнейшее изложение решения задачи будем сопровождать необходимыми иллюстрациями. На рис.1а приведено неискаженное изображение (размером 256 на 256 пикселей), модуль его спектра - рис.1б и УОС - рис.1в.

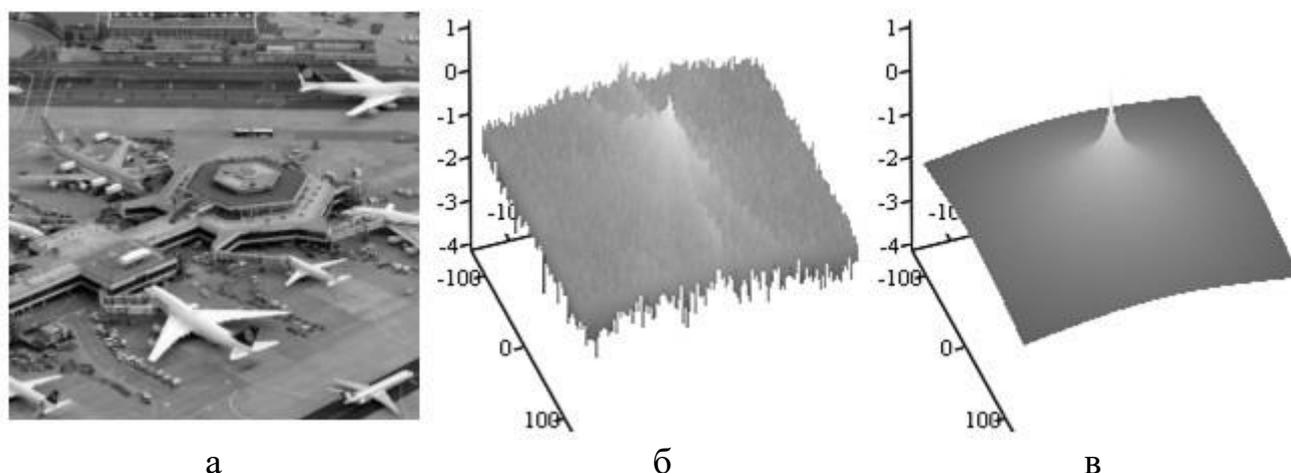


Рис. 1. Неискаженное изображение – (а); модуль его спектра – (б) и универсальный опорный спектр – (в). Графики спектров приведены в логарифмированном виде по вертикали.

Предположим, что в среднем модуль спектра НИ  $|J_0(\vec{f})|$  достаточно хорошо описывается универсальным опорным спектром (УОС) [7]. В этом случае перенормировка с ограничением [12] позволяет в большей степени устранить искажения модуля спектра изображения, вызванного АФ [17]. Т.е. в случае, когда спектр представляет собой вещественную и неотрицательную функцию, метод перенормировки с ограничением (МПО) позволяет, не имея информации о форме и параметрах АФ, восстанавливать изображение.

Рис.2а демонстрирует изображение искажённое АФ Гаусса полушириной  $S_0=6$  пикселей. Рис.2б показывает восстановление рис.2а с помощью МПО без знания АФ, используя в процедуре только универсальный опорный спектр [7, 12]. В этом случае, как видно из приведённых иллюстраций, метод перенормировки с ограничением не испытывает особых проблем.

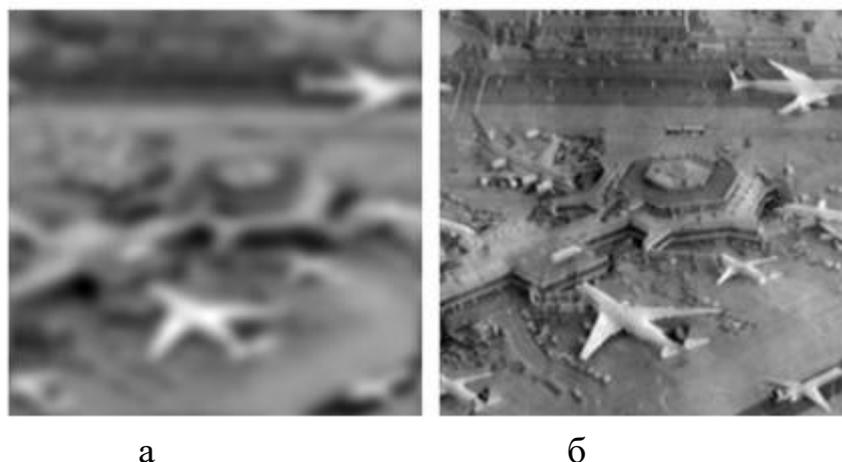


Рис.2 Изображение искажённое АФ Гаусса  $S_0=6$  - (а); Восстановленное МПО с УОС без информации об АФ изображение рис.1а. - (б).

В общем виде спектр искажающей аппаратной функции дефокусировки представляет собой вещественную функцию (возможно знакопеременную). На рис.3а приведены изображение рис.1а после воздействия АФ дефокусировки «круглое пятно» радиусом  $S_0=6$  пикселей (спектр АФ знакопеременный) и изображение рис.3б восстановленное из рис.3а методом перенормировки с ограничением [12]. Рисунок 3в показывает модуль спектра изображения рис.3б.

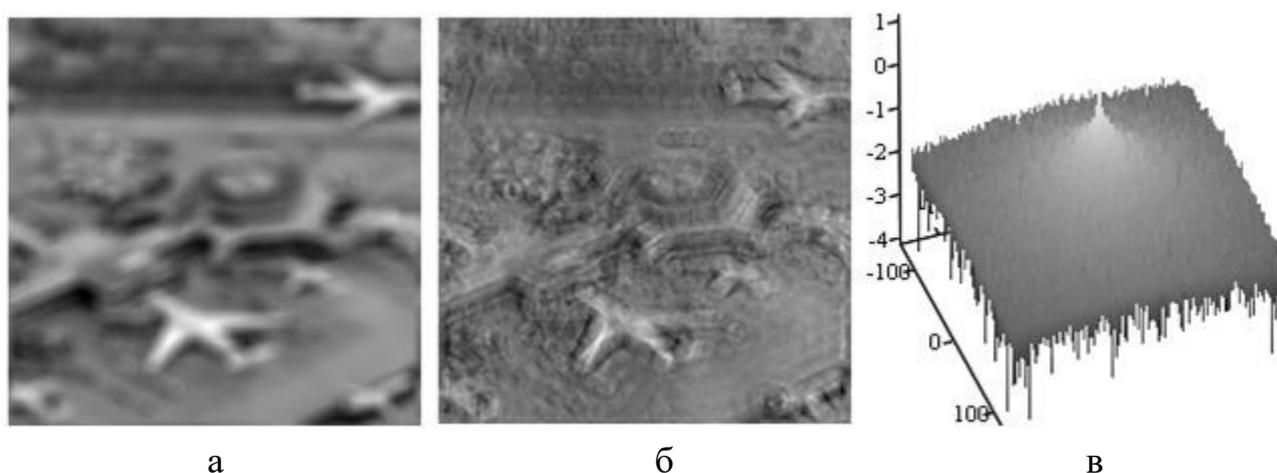


Рис.3. Искражённое АФ дефокусировки «круглое пятно» и радиусом  $S_0=6$  пикселей изображение рис.1а – (а); изображение – (б) и его модуль спектра – (в), полученное МПО с УОС без информации об АФ [12].

Как видно из рис.3б, качество восстановления оставляет желать лучшего. Это - следствие искажений знака спектра изображения, не учтённых в модели УОС, используемой в МПО. В итоге на полученном изображении появляются артефакты в основном в виде ореолов.

Принимая во внимание всё вышеизложенное, логично предположить, что поскольку в первоначальной постановке задачи АФ искажения полагается неизвестной, необходимо адаптировать УОС к искажению знака спектра изображения, а затем использовать такой УОС в МПО.

Мы полагаем, что при  $|\vec{f}| = 0$  спектр изображения не искажён и области искажения знака спектра изображения имеют минимальный поперечный размер не меньше нескольких пикселей. Тогда одним из возможных решений этой проблемы определения искажения в форме изменения знака может быть следующий алгоритм.

### 3. Алгоритм определения знака искажения спектра изображения.

Сформируем усреднённый по квадратному спрайту размером 5 пикселей модуль спектра искажённого изображения (УС-5). Сформируем усреднённый по квадратному спрайту размером 21 пикселей модуль спектра искажённого изображения (УС-21). Отметим, что при получении усреднённых спектров УС-5 и УС-21 усреднялись не сами модули спектра изображения, а логарифмы модуля изображения. После усреднения производилось экспоненцирование. Применим к УС-5 метод нормировки с ограничением [16] с помощью УС-21 и УОС. В результате получим нормированный на УОС усреднённый спектр изображения (УНС):

$$Uns[i, j] = \frac{Us_5[i, j]}{Us_{21}[i, j]} UOS[i, j] \quad (2)$$

где  $Uns[i, j]$ ,  $Us_5[i, j]$ ,  $Us_{21}[i, j]$  и  $UOS[i, j]$  обозначают УНС, УС-5, УС-21 и УОС соответственно.

На рис.3 представлены модули спектров УС-5, УС-21 и УНС.

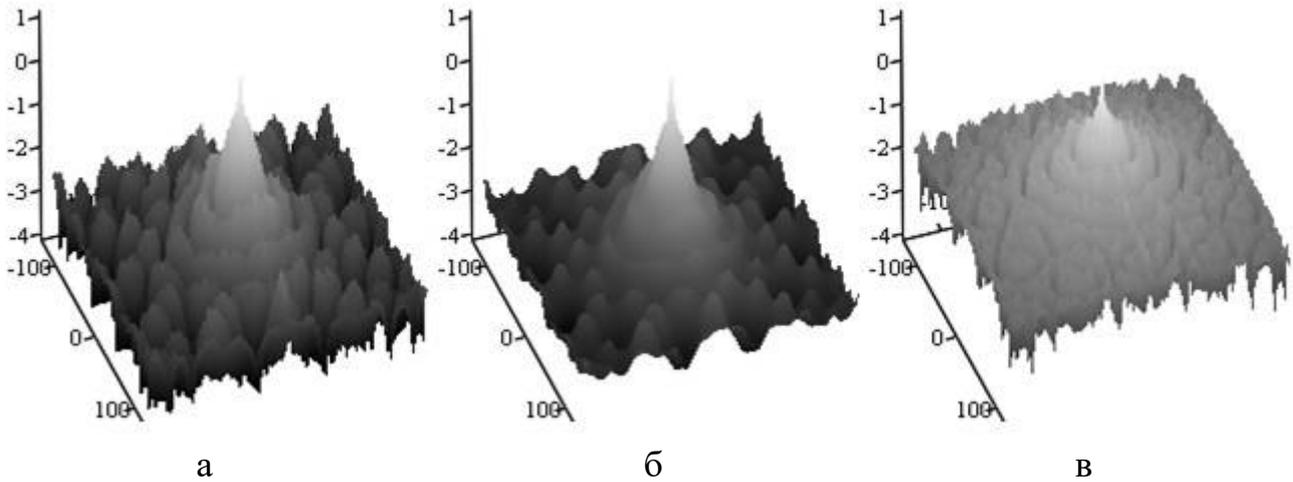


Рис.4. Модули спектров, усредненные по спрайту (при различных размерах спрайта  $n_{ij}$ );  $n_{ij}=5$  – (а) и  $n_{ij}=21$  – (б). Нормированный на УОС усредненный спектр изображения (УНС) – (в).

Этот спектр УНС в среднем соответствует неискаженному изображению, но и содержит отклонения от неискаженного изображения, вызванного областями близкими к нулю спектра искажающей АФ. Используем эти области для определения областей изменения знака искажения, поскольку при изменении знака необходимо пересечь ноль.

Ограничения на размеры спрайтов для усреднения спектров обусловлены следующими соображениями:

С одной стороны размер спрайта для УС-5 не может быть слишком большим поскольку будет утеряна информация о расположении минимумов модуля спектра АФ (нулей спектра АФ). С другой стороны размер должен быть достаточным для усреднения чтобы исключить (уменьшить) влияние одиночных выбросов не характеризующими АФ.

Размер спрайта для усреднения в знаменателе (УС-21) должен быть значительно больше спрайта для усреднения в числителе (УС-5), иначе информация о виде АФ может быть потеряна. Кроме того размер спрайта для знаменателя должен быть значительно меньше размера изображения, чтобы частично скомпенсировать влияние особенностей спектра изображения на общее частное (УС-5/УС-21).

Из (2) следует, что нули спектра УНС определяются отношением УС-

5/УС-21. На рис.5 представлены результаты попиксельного деления усредненных по спрайтам размера 5 и 21 пиксель модулей спектров АФ и модулей спектров искаженного изображения УС-5/УС-21.

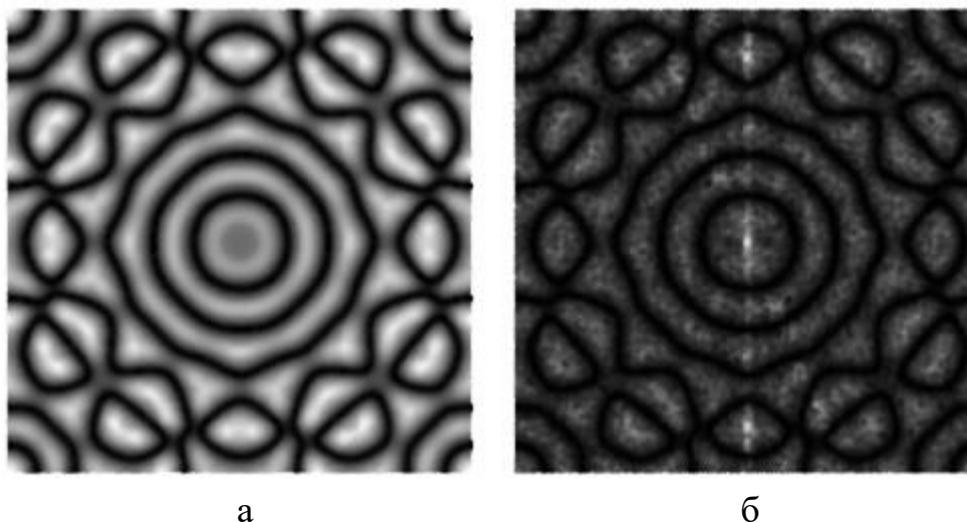


Рис.5. Частное усреднения модуля спектра АФ по разным спрайтам (размером 5 пикселей и 21 пикселей) вид сверху - (а); частное усреднённых спектров УС-5 (рис.4а) на УС-21 (рис.4б) вид сверху - (б).

Сравнение рис.5а и рис.5б позволяет сделать вывод о том, что положение черных областей, соответствующих малым значениям отношений модулей спектров, одинаковое на обоих рисунках. Это же иллюстрируют графики разрезов отношений спектров на рис.6. На рис.6 видно, что графики на рис.6а и рис.6б, лежащие ниже значения 0.7 (синяя прямая), практически одинаковы.

Обозначим частное усреднённых спектров (УС-5 на УС-21) - (ЧУС).

#### **Алгоритм определения искажения знака спектра:**

1. Двигаемся, начиная от пикселя с координатами  $|\vec{f}|=0$ , по прямой к заданному пикселю мы ищем место где значение ЧУС становится меньше заданного уровня отсечки.
2. Если ЧУС (из пункта 1), уменьшаясь, пересекает заданный уровень отсечки, а затем, увеличиваясь, вторично пересекает уровень отсечки, то середину этого отрезка мы полагаем местом изменения знака спектра АФ и, соответственно, спектра искажённого изображения и так же адаптированного УНС.
3. Аналогичным порядком, возрастая, ЧУС (из пункта 1) при пересечении

уровня отсечки, вычисляется изменение знака адаптированного УНС.

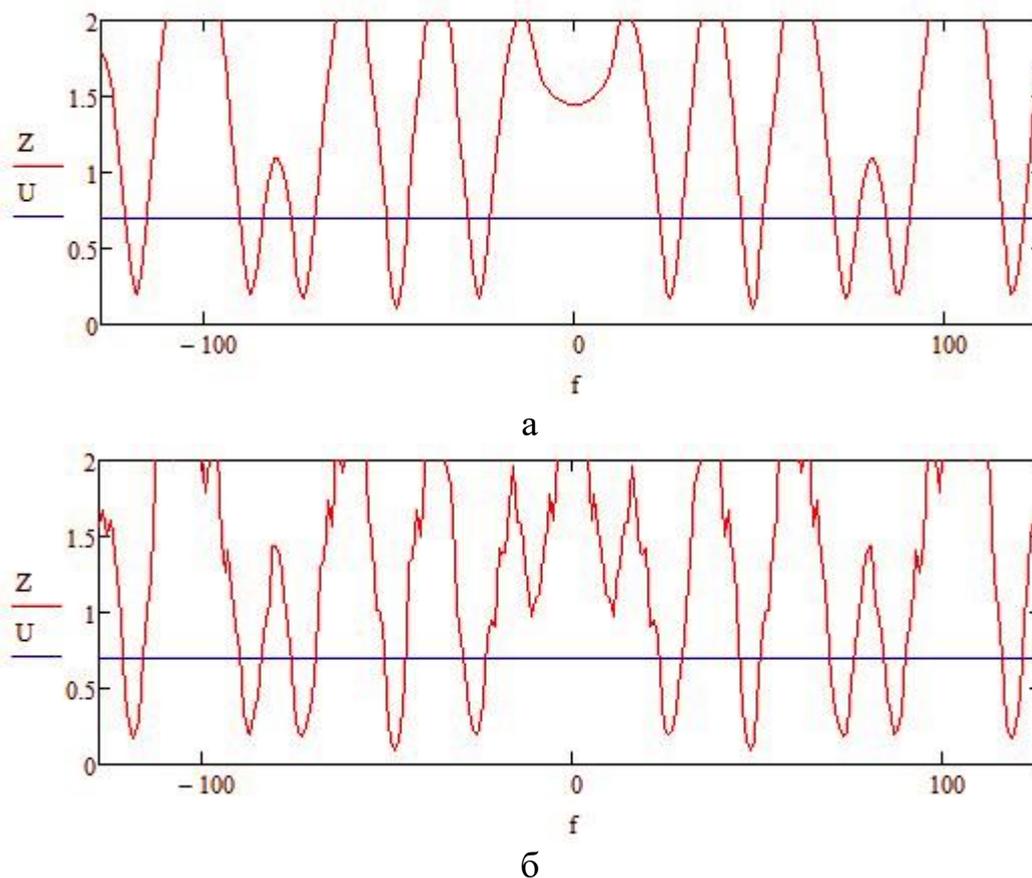
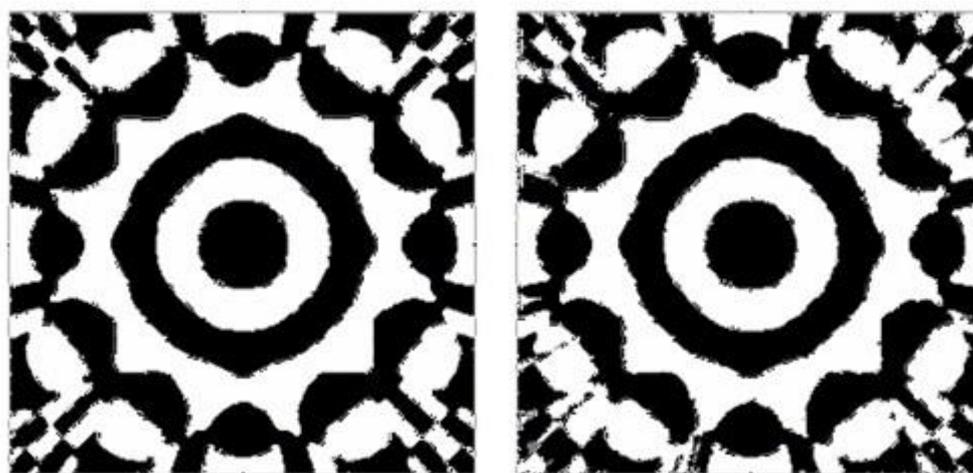


Рис.6. Графики разрезов вдоль оси абсцисс проходящие через точку, соответствующую  $|\vec{f}|=0$  красная линия, уровень отсечки - синяя линия: частное усреднения модуля спектра АФ по разным спрайтам (размером 5 пикселей и 21 пиксел) для рис.5а - (а); частное усреднённых спектров УС-5 (рис.4а) на УС-21 (рис.4б) для рис.5б - (б).

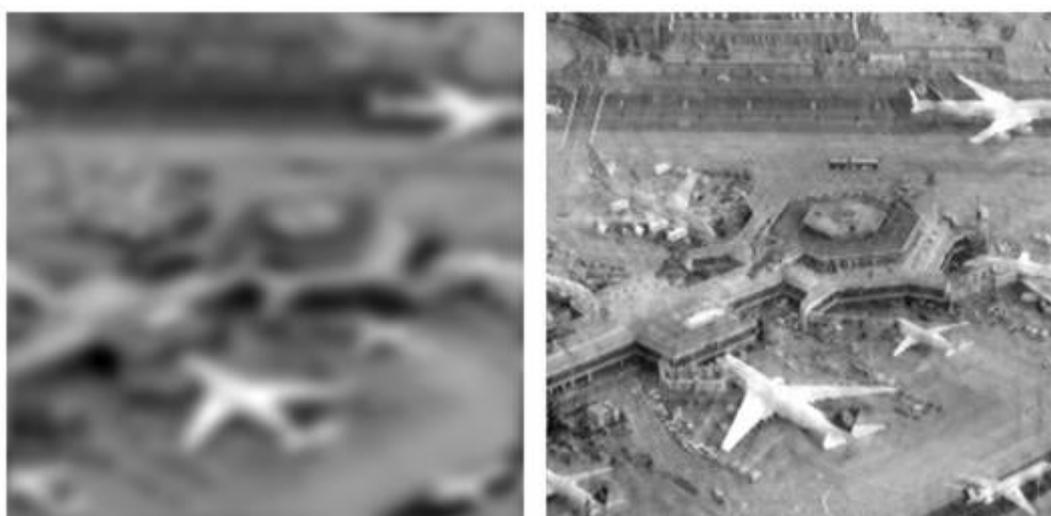
В результате получаем матрицу знака спектра АФ (МЗ) или матрицу искажения знака спектра изображения - заполненную единицами там, где оценка действительной части спектра АФ положительна и минус единицами там, где соответствующая оценка указывает на отрицательные значения действительной части спектра АФ. Рисунок 7 демонстрирует матрицы МЗ 256 на 256 пикселей, где области с отрицательными значениями (белый цвет), и с положительными значениями (чёрный цвет). Рис.7а соответствует рис.5а (частное усреднения модуля спектра АФ по разным спрайтам (размером 5 пикселей и 21 пикселей)), а рис.7б иллюстрирует результат выполнения вышеописанного алгоритма.



а

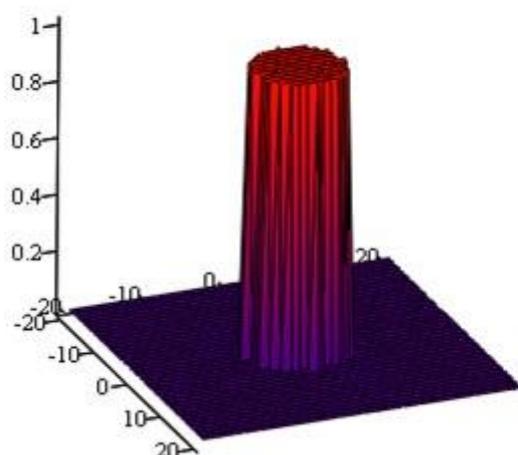
б

Рис.7 Матрицы МЗ для рис.5а - (а); для рис.5б - (б) области с отрицательными значениями (белый цвет) и с положительными значениями (чёрный цвет).



а

б



в



г

Рис.8. Дефокусированное изображение (а); восстановленное изображение (б); АФ искажения в пространственной области (в); матрица знака спектра АФ (г).

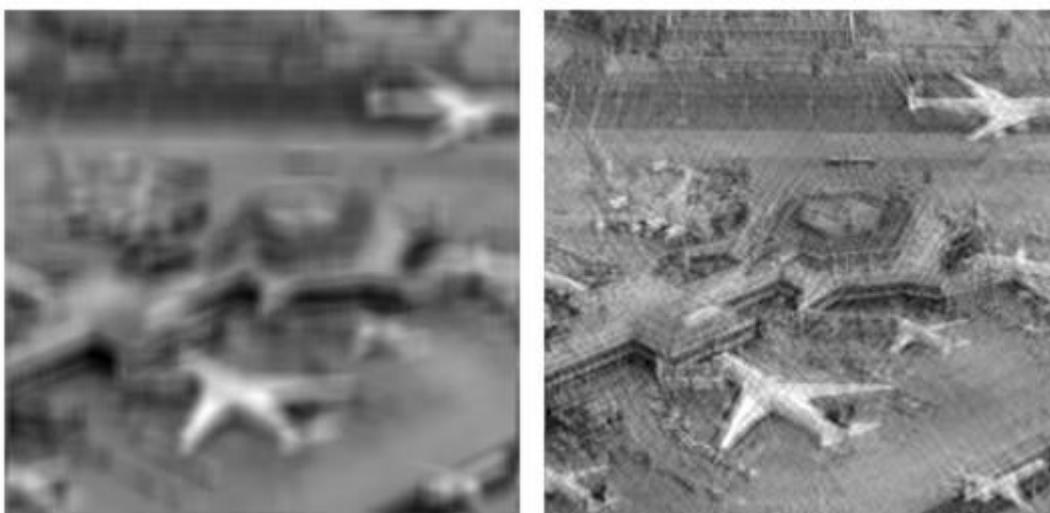
Полученные данные об изменении знака спектра искажённого изображения учтём в УНС, изменив его знак в каждой точке соответствующим образом, т.е. попиксельно умножив УНС на матрицу МЗ.

Поскольку модуль, соответствующий в среднем модулю спектра неискаженного изображения, найден, и области изменения знака спектра изображения определены и зафиксированы в УНС, можно получить спектр восстановленного изображения с помощью метода перенормировки с ограничением [12]. В качестве УОС при этом будет выступать УНС, вычисленный только на основании спектра искажённого изображения по описанной выше методике.

На рис.8а представлено изображение, искаженное АФ, отображенное на рис.8в. Знак спектра АФ иллюстрирует рис.8г. Применение алгоритма для определения знака искажения спектра изображения (знака спектра АФ) и использование МПО позволяет получить восстановленное изображение, представленное на рис.8б.

#### **Результаты работы алгоритма для различных видов АФ дефокусировки:**

Рисунки 9 - 13 позволяют сделать вывод о том, что достаточно большое изменение формы АФ слабо влияет на результаты восстановления по представленному алгоритму.



а

б

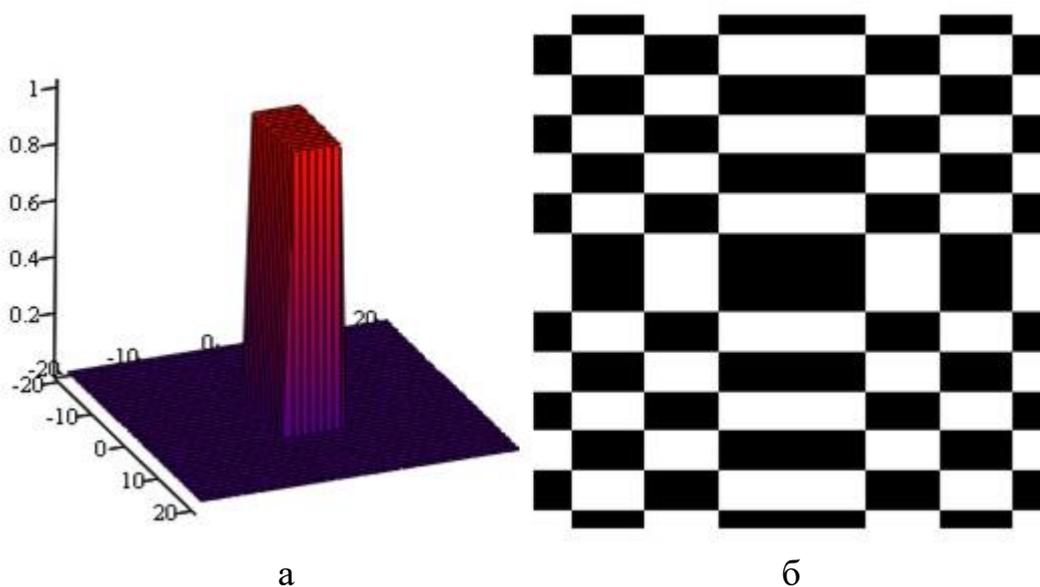


Рис.9. Дефокусированное изображение (а); восстановленное изображение (б); АФ искажения в пространственной области (в); матрица знака спектра АФ (г)

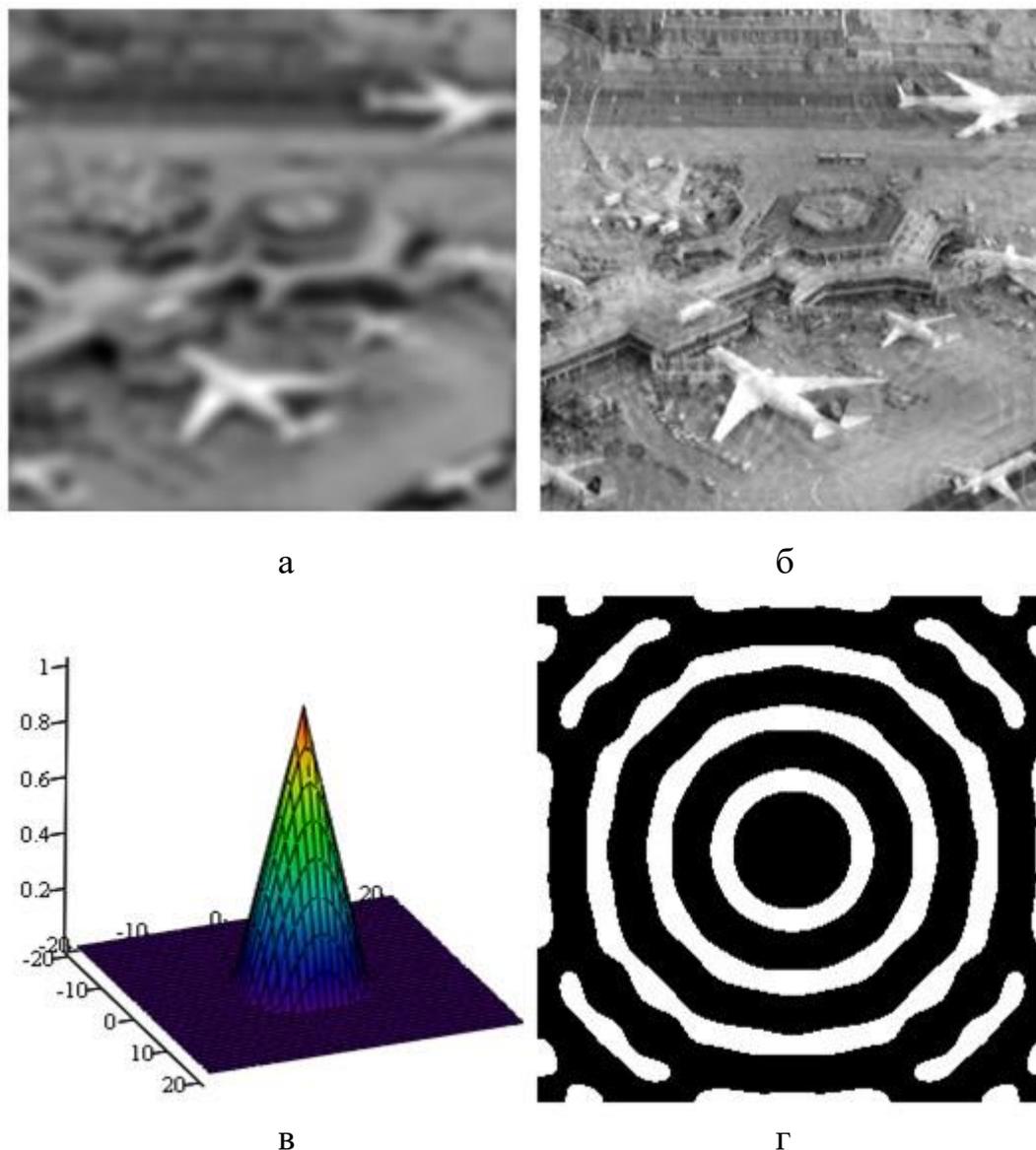


Рис.10. Дефокусированное изображение (а); восстановленное изображение (б);

АФ искажения в пространственной области (в); матрица знака спектра АФ (г).

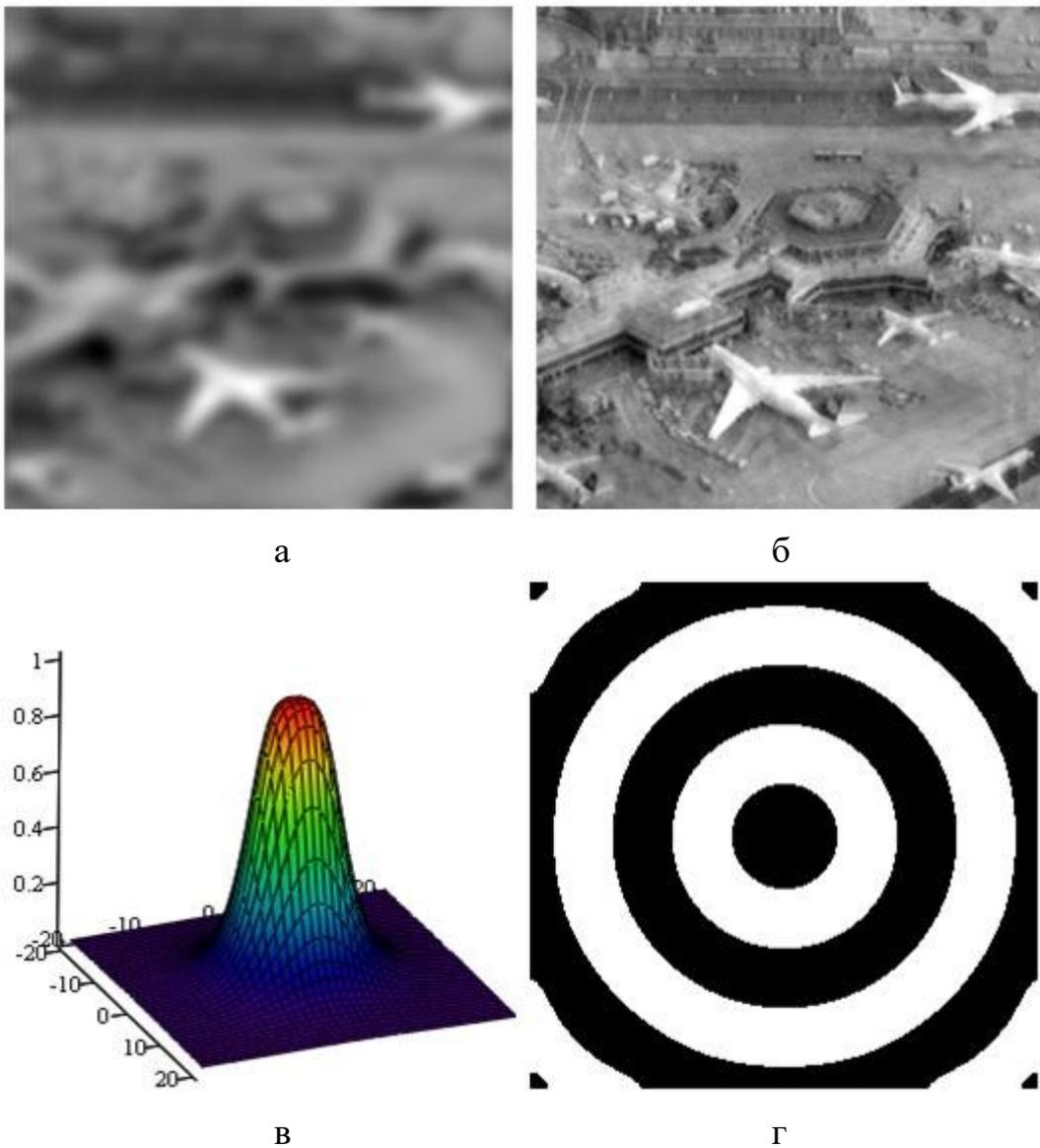


Рис.11. Дефокусированное изображение – (а); восстановленное изображение – (б); АФ искажения в пространственной области - (в); матрицу знака спектра АФ - (г). АФ соответствует АФ Баттерворта [1] при  $n=2$ .

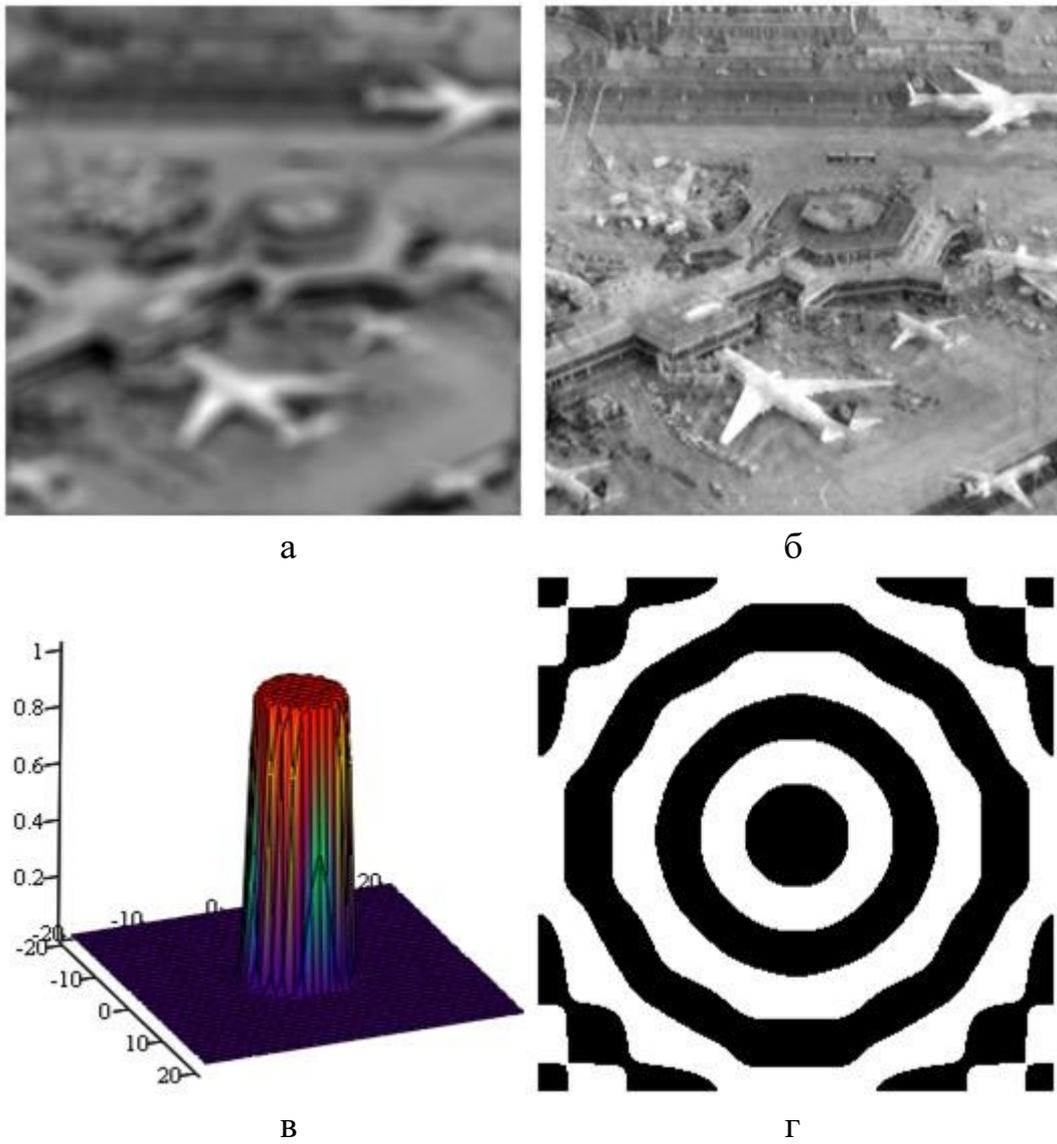
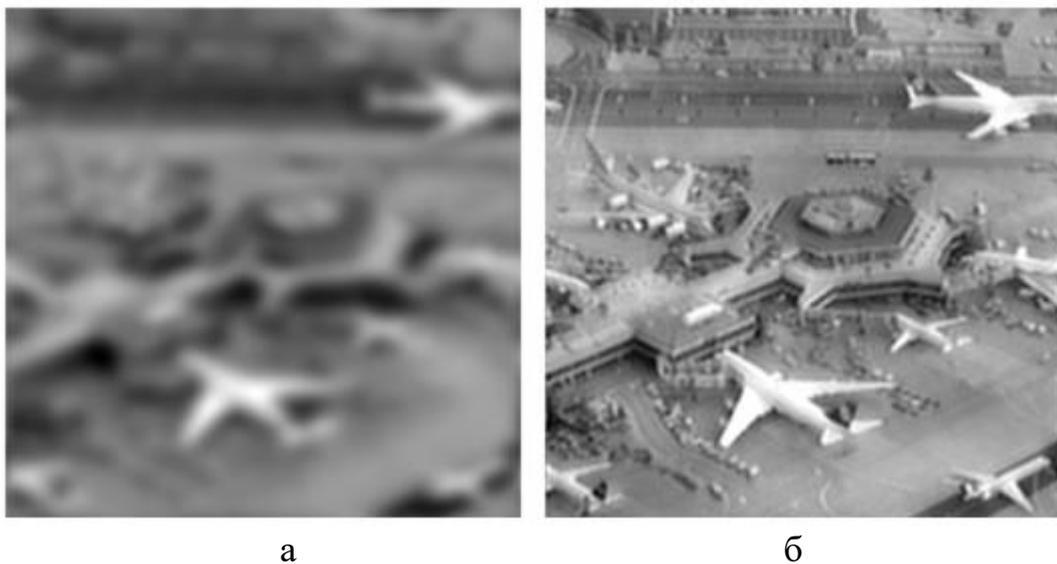


Рис.12. Дефокусированное изображение (а); восстановленное изображение (б); АФ искажения в пространственной области (в); матрица знака спектра АФ (г). АФ соответствует АФ Баттерворта [1] при  $n=20$ .



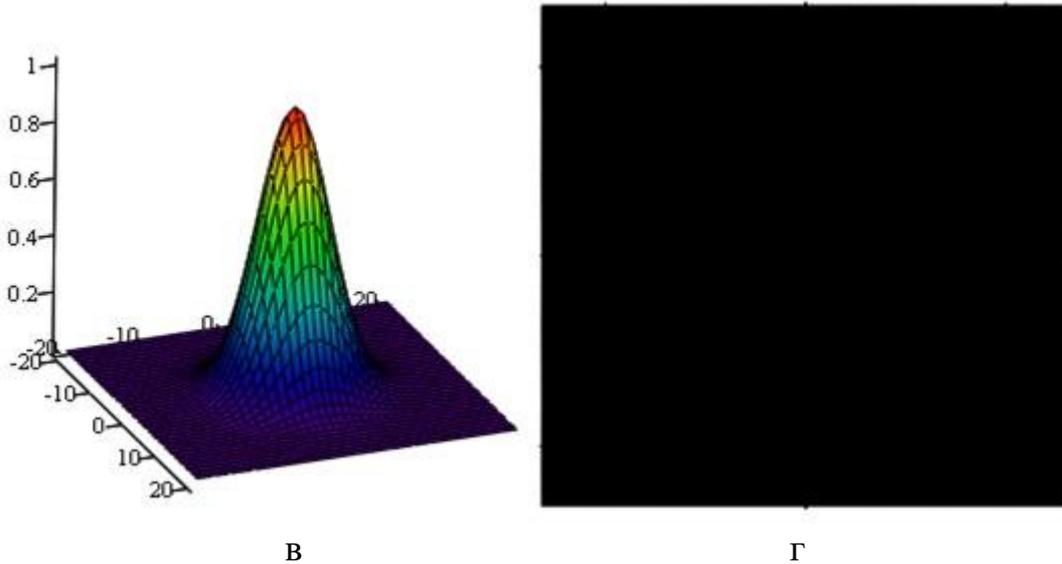


Рис.13. Дефокусированное изображение (а); восстановленное изображение (б); АФ искажения в пространственной области (в); матрица знака спектра АФ (г). АФ соответствует АФ Гаусса [1] при  $S_0=6$ .

#### 4. Заключение

1. Информация об искажении спектра дефокусированного изображения только в виде изменения модуля и знака спектра оказывается достаточной для восстановления изображения.

2. Использование универсального опорного спектра (УОС) в методе перенормировки с ограничением (МПО) позволяет эффективно корректировать модуль спектра изображения, искаженного дефокусом.

3. Искажения знака спектра изображения возможно определить, используя нормированный на УОС усредненный спектр изображения (УНС).

4. Предлагаемый алгоритм восстановления дефокусированного изображения дает результаты, слабо зависящие от вида и параметров аппаратной функции.

#### Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
2. Потапов А.А. , Гуляев Ю.В. , Никитов С.А. , Пахомов А.А. , Герман В.А. Новейшие методы обработки изображений – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 456 с.

3. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
4. Favaro, Paolo; Soatto, Stefano; Burger, Martin; Osher, Stanley J (2008). Shape from defocus via diffusion. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 30(3), pp. 518-531. IEEE Computer Society 10.1109/TPAMI.2007.1175
5. Chan T. and Wong C.-K., Total variation blind deconvolution. IEEE Transactions on Image Processing, 1998.
6. Chan T. C. and Wong C. Convergence of the alternating minimization algorithm for blind deconvolution. Linear Algebra and its Applications, 316(13):259 – 285, 2000.
7. Гуляев Ю. В., Зражевский А. Ю., Кокошкин А. В., Коротков В. А., Черепенин В.А. «Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 3. Универсальный опорный спектр». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2013, №12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.html>
8. Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. «Универсальный опорный спектр и его использование для нахождения аппаратной функции искажения и восстановления изображений». VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 24 – 26 ноября 2014 г., Москва, Доклады. ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва 2014 г., стр. 191-195.
9. Кокошкин А. В., Коротков В. А., Коротков К. В., Новичихин Е.П. «Слепое восстановление изображений, искажённых смазом и дефокусировкой, при неизвестной форме и параметрах АФ». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2014, №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep14/8/text.html>
10. Кокошкин А. В., Коротков В. А., Коротков К. В., Новичихин Е.П. «Использование универсального опорного спектра для оценки отношения

- шум – сигнал в фильтре Винера». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2015, №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/6/text.html>
11. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. «Использование универсального опорного спектра для восстановления искажённых изображений при наличии помех и шума с неизвестными параметрами. Метод перенормировки с ограничением и фильтр Винера». IX Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 23 – 25 ноября 2015 г., Москва, Доклады, Издание JRE – ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва 2015 г., стр. 105-110.
  12. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. «Использование метода перенормировки с ограничением для восстановления искажённых изображений при наличии помех и шума с неизвестными параметрами». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2015, №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/4/text.html>
  13. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. «Прогнозирование возможного улучшения качества искажённых изображений». IX Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь», 23 – 25 ноября 2015 г., Москва, Доклады, Издание JRE – ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва 2015 г., стр.111-115.
  14. Кокошкин А. В., Коротков В. А., Коротков К. В., Новичихин Е. П. «Метод прогнозирования возможного улучшения качества искажённых изображений». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2015, №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/5/text.html>
  15. Зражевский А. Ю., Кокошкин А. В., Коротков В. А., «Влияние спектрально-локальных помех на восстановление изображения методом опорного изображения». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал], 2014, №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/9/text.html>
  16. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. «Восстановление радиоизображения, искажённого спектрально-локальными помехами и аппаратной функцией с неизвестными боковыми лепестками». //

Журнал Радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016, №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug16/3/text.html>

17. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. «Использование перенормировки спектра для восстановления изображений, искажённых гидрометеорами». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/3/text.pdf>

**Для цитирования:**

А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин. Автоматическое восстановление дефокусированных изображений без определения вида и параметров аппаратной функции. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr18/8/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.4.8