
**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

УДК 621.396

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИСКАЖЕННЫХ АППАРАТНОЙ
ФУНКЦИЕЙ С НЕИЗВЕСТНЫМИ БОКОВЫМИ ЛЕПЕСТКАМИ**

© 2018 г. В. А. Черепенин¹, А. В. Кокошкин^{2,*}, В. А. Коротков²,
К. В. Коротков², Е. П. Новичихин²

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7.

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141120, Фрязино, Московской обл., площ. акад. Введенского, 1.

*E-mail: shvarts65@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2016 г.

Предложен метод компенсации влияния неизвестных боковых лепестков искажающей аппаратной функции на качество восстановления изображений. Представлен алгоритм обработки, основанный на том, что известен главный лепесток аппаратной функции и его спектр вместе с универсальным опорным спектром использованы для компенсации вклада неизвестных боковых лепестков в спектр искаженного изображения. Исследована устойчивость работы метода к шумам присутствующим на улучшаемых изображениях и различным формам искажающих аппаратных функций. Показана высокая эффективность работы метода компенсации при значительном превышении (в четыре раза) суммарного вклада от неизвестных боковых лепестков к вкладу от главного лепестка в результирующие яркости искаженного изображения.

DOI: 10.7868/S0033849418030038

При пространственно некогерентном формировании изображения в системах радиовидения (как в радио, так и в оптическом диапазонах), нередко бывают ситуации, когда точное знание формы аппаратной функции (АФ) оказывается невозможным. Особенно это касается боковых лепестков (БЛ) АФ. Причиной этого могут являться, например, такие объективные естественные факторы, вызывающие разнолучевое распространение радиоволн или рассеяние: как турбулентность атмосферы, дымка, облака; так и конструктивные особенности антенных систем, не позволяющие провести достаточно точное трехмерное измерение их диаграммы направленности. В некоторых случаях, при небольшом (порядка одного процента), уровне БЛ относительно главного лепестка (ГЛ), общий суммарный вклад БЛ в результирующие яркости изображения может в несколько раз превышать вклад ГЛ. Особенно большое значение это имеет для систем радиовидения с узкой диаграммой направленности ГЛ, поскольку в таком случае более вероятно значительное превышение (в разы) суммарного вклада от неизвестных БЛ к вкладу от ГЛ в результирующие яркости искаженного изображения. В этой связи важной является постановка задачи о восстановлении изображений искаженных аппаратной функцией с неизвестными боковыми лепестками.

Формирование изображения в ряде случаев можно описывать при помощи уравнения свертки [1]:

$$g(x, y) = \iint dx' dy' a(x - x', y - y') f(x', y') + n(x, y), \quad (1)$$

где $g(x, y)$ изображение объекта $f(x, y)$, сформированное аппаратной функцией $a(x, y)$; $n(x, y)$ — аддитивный шум.

На качество изображения влияют как свойства аппаратной функции (АФ), так и характеристики шума. Для восстановления изображения $f(x, y)$ необходимо знать как АФ, так и характеристики шума. Обычно АФ известна в рамках главного лепестка антенной системы, а влияние на качество изображения боковых лепестков предполагается несущественным. Это далеко не так, поскольку чем более “острым” является ГЛ, тем больший угловой диапазон занимают БЛ. Под БЛ АФ будем понимать все то, что лежит вне ГЛ антенной системы. Форма и характеристики БЛ АФ зависят не только от антенной системы, но и от среды, расположенной между объектом и антенной системой. Поэтому характеристики БЛ измерить достаточно сложно. Как показано в работах [2, 3] БЛ могут оказывать сильное негативное влияние на качество восстановленного $f(x, y)$ изображения. В работе [4] была исследована возможность

восстановления изображения при неизвестных БЛ. Однако изложение способа, построенное на основе анализа формы АФ, было достаточно сложным и в нем отсутствовал анализ влияния шума и формы БЛ.

Существуют оригинальные работы, учитывающие влияние неизвестной среды распространения зондирующего сигнала вносящей вклад в искажающую АФ. В работе [5] описана модификация метода идентификации линейной модели наблюдения, использующего соотношение между энергетическими спектрами входного и выходного изображений. При отсутствии априорных данных об искажающей системе предлагается методика восстановления неизвестной АФ по наблюдаемому изображению с использованием маски границ, в качестве которой для изображений дистанционного зондирования Земли могут выступать границы векторной карты из геоинформационных систем, описывающие границы объектов на изображении. В работе [6] предложено объединение моделей атмосферных искажений и линейной спектральной смеси в единую модель. Этот метод определения параметров линейной спектральной смеси для гиперспектральных изображений, позволяет полностью исключить предварительную процедуру коррекции атмосферных искажений зарегистрированного изображения.

Для восстановления изображений, подвергшихся искажениям типа дефокусировки в работе [7] предлагается технология синтеза фильтра с конечной импульсной характеристикой, в которой вместо определения самих отсчетов импульсного отклика осуществляется идентификация параметров непрерывной функции, аппроксимирующей импульсный отклик. При этом зависящее от небольшого числа параметров параметрическое семейство аппроксимирующих функций задается с учетом желаемых частотных характеристик КИХ-фильтров, предназначенных для коррекции искажений.

Как правило, в известных нам работах, исследуется степень разрушающего воздействия неизвестных боковых лепестков (БЛ) на изображение при восстановлении. Наша работа впервые рассматривает возможность компенсации влияния неизвестных боковых лепестков на качество восстановления радиоизображений.

В данной работе рассмотрен способ восстановления изображения при неизвестных БЛ и исследовано влияние шума $n(x, y)$ и формы АФ на качество восстановления изображения.

Отметим еще раз, что, искажающая изображение АФ, соответствует АФ антенны только в случае отсутствия окружающих антенну предметов

и в случае не поглощающей и не рассеивающей среды распространения (вакуум). Если среда распространения – рассеивающая, то вклад ГЛ в изображение с ростом рассеивания уменьшается, вклад БЛ – растет. Но пока не произошло “разрушение” диаграммы направленности антенны на наш взгляд можно в некотором приближении полагать, что форма ГЛ антенны совпадает с формой ГЛ АФ. В дальнейшем полагаем его известным. Боковыми лепестками мы считаем ту часть АФ, которая не вошла в ГЛ. Форма БЛ АФ меняется существенно [8, с. 106].

Данная работа основана на двух положениях:

1. В силу того, что в пространственной области ГЛ АФ всегда уже чем БЛ (хотя бы потому, что БЛ это то, что остается после “вырезания” из АФ ГЛ), ширина спектра БЛ значительно уже спектра ГЛ.

2. В среднем модуль спектра неискаженных изображений объектов имеет форму слабо меняющуюся от изображения к изображению. Это позволило ввести в использование при обработке изображений универсальный опорный спектр (УОС) в качестве модели образца амплитудного спектра неискаженного изображения [9]:

$$UOS(R) = 128[0.55\exp(-2.5R^{0.75}) + -0.45\exp(-1.5R^{0.12})],$$

где R – квадрат модуля пространственной частоты, 128 – половина максимальной яркости.

Опираясь на положение 1, при помощи УОС можно оценить вклад ГЛ в спектр изображения.

В спектральном представлении соотношение (1) выглядит как алгебраическое уравнение [1]:

$$G(u, v) = A(u, v)F(u, v) + N(u, v), \quad (2)$$

где $G(u, v)$, $F(u, v)$ и $N(u, v)$ – соответственно пространственные спектры изображения $g(x, y)$, объекта $f(x, y)$ и шума $n(x, y)$; $A(u, v)$ – нормированный спектр АФ $a(x, y)$. Под нормированным спектром мы подразумеваем спектр, нормированный так, чтобы его максимальное значение было равно единице.

Будем считать, что АФ состоит из суммы:

$$a(x, y) = k_g a_g(x, y) + k_b a_b(x, y), \quad (3)$$

где $a_g(x, y)$ и $a_b(x, y)$ обозначают главный и боковые лепестки соответственно, k_g и k_b определяют максимальный уровень главного лепестка и БЛ соответственно. Нормированные спектры $a_g(x, y)$ и $a_b(x, y)$ обозначим, как $A_g(u, v)$ и $A_b(u, v)$

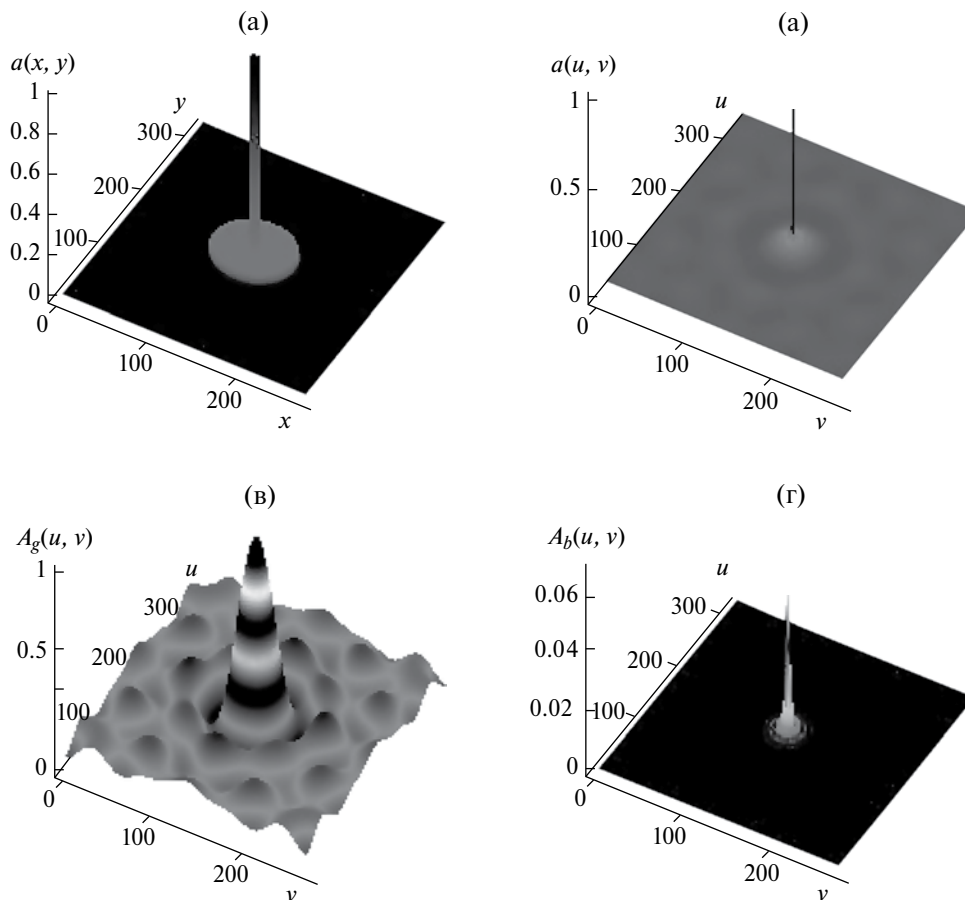


Рис. 1. Аппаратная функция (а), ее спектр (б), спектр главного лепестка радиусом $S_0 = 5$ (в) и боковых лепестков радиусом $S_b = 45$ (г).

соответственно. Временно исключим из рассмотрения шум $n(x, y)$ и вернемся к нему при применении рассматриваемого метода. Если подставить спектр выражения (3) в соотношение (2), то получим:

$$G(u, v) = k_g A_g(u, v) F(u, v) + k_b A_b(u, v) F(u, v). \quad (4)$$

В выражении (4) второй член правой части является вкладом БЛ в изображение. Если величина $|A_g(u, v)| |F(u, v)|$ известна, то можно вычислить $F(u, v)$ при помощи следующего алгоритма:

Шаг 1. Делаем оценку

$$A_g(u, v) F(u, v) \approx |A_g(u, v)| |F(u, v)| \frac{G(u, v)}{|G(u, v)|}. \quad (5)$$

Шаг 2. Находим $F(u, v)$ при помощи фильтра Винера [1] (см. Приложение).

Шаг 3. Выполняем обратное преобразование Фурье и получаем изображение объекта $f(x, y)$.

Оценка (5) справедлива при условии малого влияния БЛ на фазовый спектр $F(u, v)$.

Рассмотрим указанный выше алгоритм восстановления изображения при неизвестных БЛ на примере АФ, состоящей из комбинации двух фильтров Баттерворта.

Отметим, что при компенсации БЛ нигде не использовали форму спектра БЛ $A_b(u, v)$. Использовали только нормированный спектр известного ГЛ $A_g(u, v)$. Форма спектра ГЛ не является принципиальной; главное, чтобы она соответствовала поставленной задаче.

На рис. 1 представлены тестовая АФ, ее спектр и спектры ГЛ и БЛ.

На рис. 2 представлены следующие изображения: неискаженное изображение $f(x, y)$ (Луна) (рис. 2а); искаженное изображение, полученное при использовании показанной на рис. 1 АФ (рис. 2б); восстановленное изображение в предположении отсутствующих БЛ (рис. 2в) и восстановленное на основе оценки (5) изображение (рис. 2г).

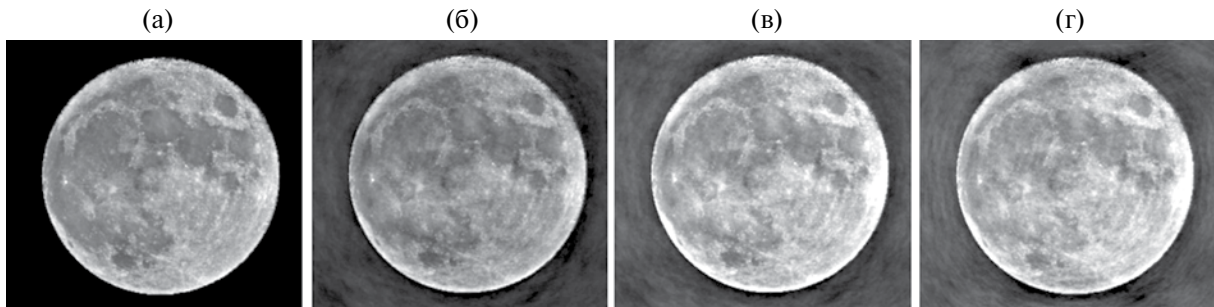


Рис. 2. Аппаратная функция (а), ее спектр (б), спектр главного лепестка радиусом $S_0 = 5$ (в) и боковых лепестков радиусом $S_b = 45$ (г).

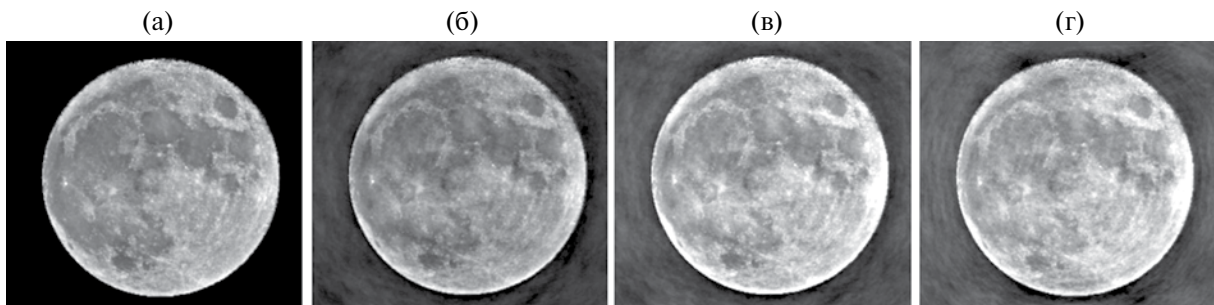


Рис. 3. Изображения Луны; а – неискаженное; б–г – восстановленные на основе оценки (7) при отношении суммы амплитуд БЛ к сумме амплитуд ГЛ равным, соответственно 0, 1, 4.

Из анализа рис. 2 можно сделать вывод о том, что отсутствие учета БЛ не позволяет восстановить изображение, а использование оценки (5) делает возможным восстановление с неизвестными БЛ.

Однако такой подход не может быть использован, так как величина $|A_g(u, v)| |F(u, v)|$ обычно неизвестна. Тем не менее, используя УОС [9], можно оценить величину $|A_g(u, v)| |F(u, v)|$ и получить восстановленное изображение сравнимое по качеству с рис. 2 г. Чтобы сделать это, сравним графики на рис. 1в и рис. 1вг. Как видно, амплитудные спектры ГЛ и БЛ сильно различаются. Используем этот факт для корректной оценки первого слагаемого в (4). Соответствующий алгоритм выглядит следующим образом:

Шаг 1. В качестве начальной оценки $|A_g(u, v)| |F(u, v)|$ используем представление

$$|A_g(u, v)| |F(u, v)| \approx |A_g(u, v)| UOS(u, v). \quad (6)$$

Шаг 2. Аппроксимируем $|G(u, v)|$ – модуль спектра искаженного АФ изображения – методом наименьших квадратов при помощи оценки (6). Для того, чтобы уменьшить негативное влияние шумов и спектра БЛ исключим при аппроксимации область вокруг нуля частоты радиусом $2/\pi S_0$ и область, где $|A_g(u, v)| < 0.1$. Таким образом, происходит оценка k_g .

Шаг 3. Проведем окончательную оценку $|A_g(u, v)| |F(u, v)|$:

$$k_g A_g(u, v) F(u, v) = G(u, v), \quad (7a)$$

если $|G(u, v)| < |A_g(u, v)| UOS(u, v) k_g$,

$$k_g A_g(u, v) F(u, v) = k_g |A_g(u, v)| UOS(u, v) \frac{G(u, v)}{|G(u, v)|}, \quad (7б)$$

если $|G(u, v)| \geq |A_g(u, v)| UOS(u, v) k_g$.

Шаг 4. Находим $F(u, v)$ при помощи фильтра Винера [1] (см. Приложение).

Шаг 5. С помощью обратного преобразования Фурье получим изображение объекта $f(x, y)$. Целесообразно при нормировке полученного восстановленного изображения проследить за сохранением средней яркости полученного изображения по сравнению с исходным искаженным изображением.

На рис. 3 представлены исходное неискаженное изображение Луны (рис. 3а) и восстановленные изображения на основе оценки (7а) и (7б) при отношении суммы амплитуд БЛ к сумме амплитуд ГЛ K_b равным соответственно: 0 (рис. 3б), 1 (рис. 3в) и 4 (рис. 3г).

Сравнение изображений на рис. 3 позволяет сделать вывод о сравнительно слабой зависимости

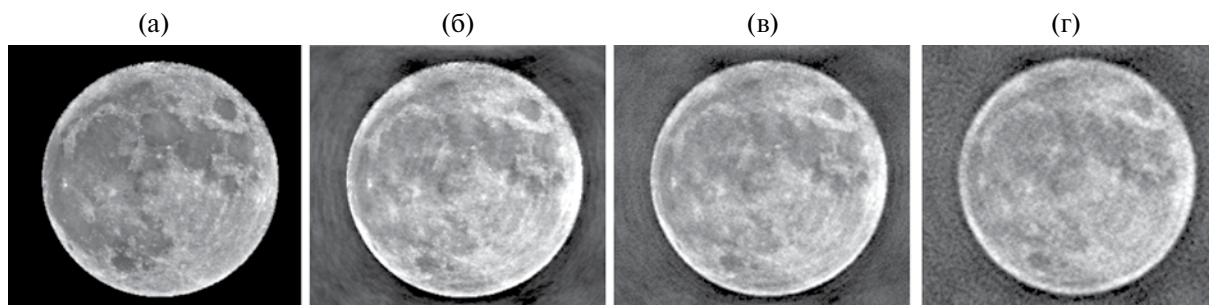


Рис. 4. Изображения Луны; а – неискаженное; б–г – восстановленные на основе оценки (7) при $K_b = 4$ и $S_h = 0, 0.5, 5$, соответственно.

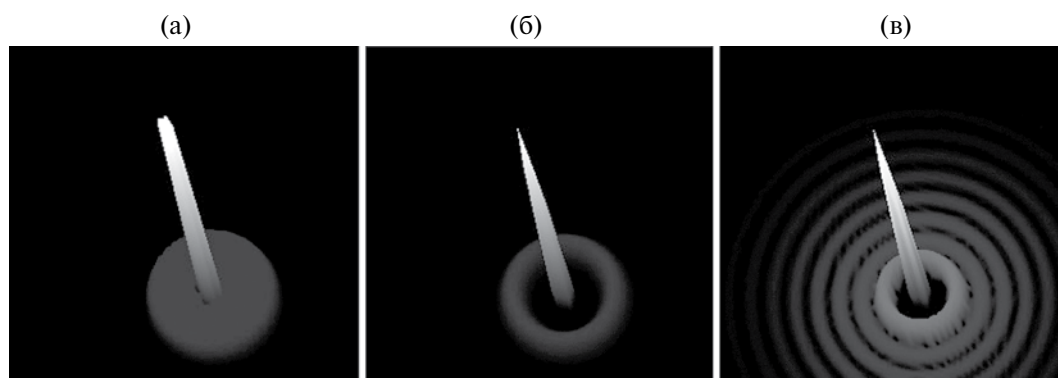


Рис. 5. Формы АФ с БЛ, используемые для тестирования метода при $S_0 = 2$; а – первый вариант, б – второй вариант, в – третий вариант. Уровень БЛ относительно ГЛ равен 0.08; $K_b = 4$.

восстановленного изображения от “мощности” БЛ по сравнению с ГЛ.

На рис. 4 представлены исходное неискаженное изображение Луны (рис. 4а) и восстановленные изображения на основе оценки (7а) и (7б) при $K_b = 4$ и амплитуды аддитивного равномерного шума равного соответственно 0 (рис. 4б), 0.5 (рис. 4в) и 5 (рис. 4г).

Сравнение изображений на рис. 4 позволяет сделать вывод об относительной устойчивости качества восстановленных изображений от негативного влияния аддитивного шума. Увеличение амплитуды шума от 0 до 0.5, что соответствует обычному шуму квантования цифровых фотографий, вызывает появление небольших артефактов. Увеличение амплитуды шума еще в десять раз усиливает эти артефакты, однако основные детали изображения почти не страдают.

Рассмотрим влияние вида АФ, величину БЛ на результаты восстановления рассматриваемым методом. К сожалению (см., например, [10–13]), большинство критериев оценки качества изображения оценивают скорее особенности самого изображения, а не его возможные искажения. Поэтому для оценки влияния на величину искажений БЛ и качества восстановления воспользуемся критерием

коэффициента восстанавливаемости изображения CRI (Coefficient of Recoverability Image) который был предложен в работе [14] в качестве меры обратимых искажений изображения. Если CRI близок к нулю, то спектр изображения сильно искажен, однако спектральной фильтрацией есть шанс его восстановить. Если CRI близок к единице, то или изображение близко к идеальному, или искажения спектра изображения преимущественно фазовые. Если нет достаточной информации о фазовых искажениях, то прогноз об улучшении изображения не может быть оптимистичным.

В качестве вариантов АФ рассмотрим следующие:

- 1) описанную выше АФ, состоящую из суммы двух функций Баттерворта;
- 2) использованную в работе [2] АФ, представляющую собой комбинацию косинусов;
- 3) использованную в работах [15, 16] АФ, представляющую собой комбинацию модулей спектров функции Баттерворта.

Рисунок 5 иллюстрирует используемые для тестирования метода формы АФ.

На рис. 6а–6в представлены графики зависимости CRI от радиуса ГЛ S_0 , отношения сумм

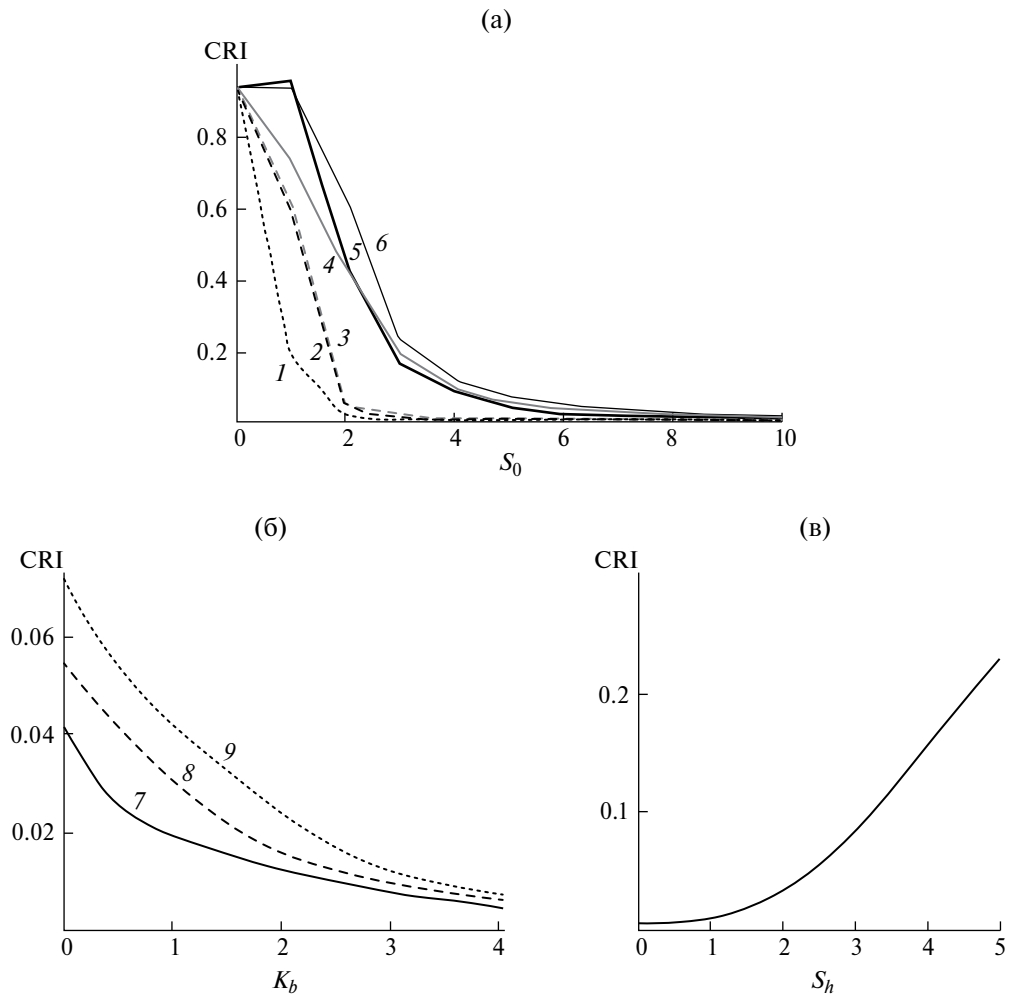


Рис. 6. Зависимости CRI от радиуса ГЛ (а), отношения суммарного вклада амплитуд БЛ к суммарному вкладу амплитуд ГЛ (б), амплитуды эффективного шума (в). На рис. 6а и 6б сплошные кривые соответствуют отсутствию БЛ, пунктирные – $K_b = 4$; кривые 1, 4, 7 построены для АФ на рис. 5а, кривые 2, 5, 8 – для АФ на рис. 5б, кривые 3, 6, 9 – для АФ на рис. 5в.

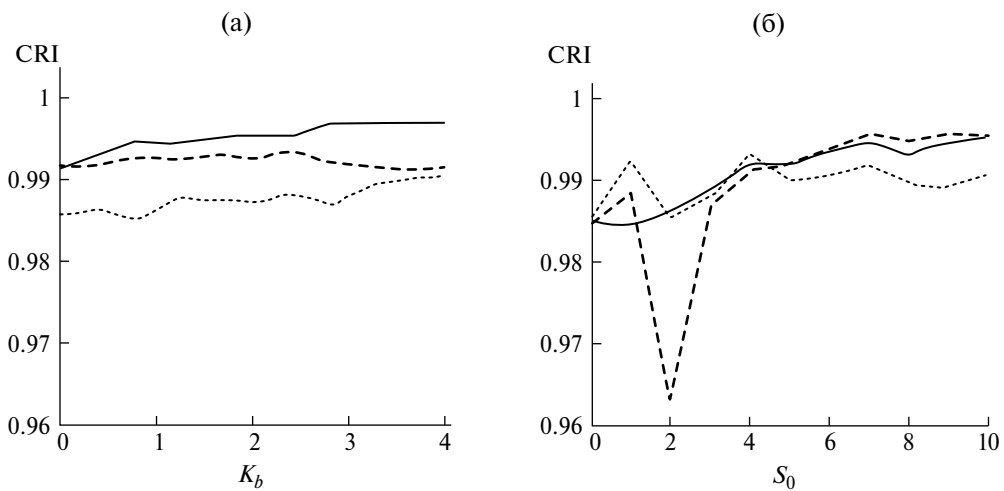


Рис. 7. Зависимости CRI для восстановленных изображений от отношения суммарного вклада амплитуд БЛ к ГЛ (а) и радиуса ГЛ (б). Пунктирные кривые построены для АФ на рис. 5а, штриховые – для АФ на рис. 5б, сплошные – для АФ на рис. 5в.

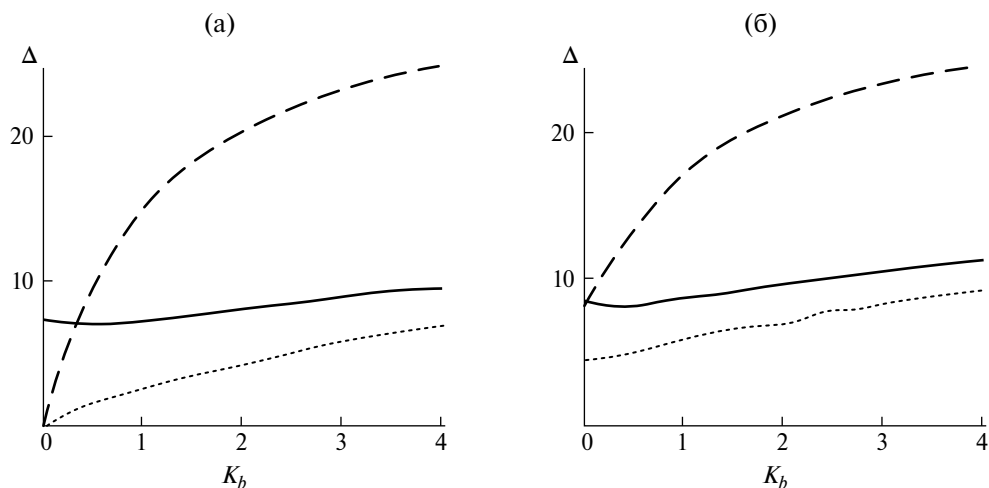


Рис. 8. Зависимости среднеквадратичного отклонения яркости от отношения суммарного вклада амплитуд БЛ к ГЛ для трех способов восстановления искаженного изображения при отсутствии шума (а) и при однородном шуме с амплитудой 0.5 (б). Штриховые кривые соответствуют варианту пренебрежения влиянием боковых лепестков (восстановление с помощью АФ только с ГЛ); пунктирные кривые – восстановлению по полностью известной АФ с БЛ; сплошные кривые – восстановлению по АФ с неизвестными БЛ согласно оценке (7).

амплитуд БЛ к ГЛ K_b и от амплитуды аддитивного шума S_h для трех разных АФ, соответствующих рис. 5а–5в.

На рис. 6а сплошные линии соответствуют отсутствию БЛ, а пунктирные линии соответствуют $K_b = 4$. Видно, что пунктирные линии лежат значительно ниже сплошных, поскольку увеличение БЛ можно трактовать, как “уширение” ГЛ.

Эта интерпретация справедлива и для объяснения спадающего характера зависимости CRI от величины K_b (рис. 6б).

Как видно из рис. 6в, с увеличением амплитуды шума величина CRI растет. Это иллюстрирует очевидный факт, что присутствие шума уменьшает возможность качественного восстановления искаженного изображения.

На рис. 7а представлены графики зависимости CRI для восстановленных изображений от радиуса ГЛ при $K_b = 4$ для трех разных АФ, соответствующих рис. 5а–5в. Все графики лежат выше значения $CRI = 0.96$. Это свидетельствует о том, что амплитудные спектры восстановлены рассмотренным методом достаточно качественно.

На рис. 7б представлены графики зависимости CRI для восстановленных изображений от отношения сумм амплитуд БЛ к ГЛ при $S_0 = 5$ для тех же АФ. Все графики лежат выше значения $CRI = 0.98$ и явной зависимости от величины БЛ нет. Это говорит о том, что

рассматриваемый метод достаточно хорошо компенсирует влияние БЛ.

На рис. 8 представлены графики зависимостей среднеквадратичного отклонения яркости Δ для трех способов восстановления искаженного изображения. Графики иллюстрируют достаточно точное восстановление изображений предложенным методом в присутствии неизвестных боковых лепестков.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Боковые лепестки могут значительно ухудшать качество изображений.
2. Влияние БЛ может быть весьма значительным даже при малой по сравнению с ГЛ амплитуде.
3. Восстановление изображений, искаженных АФ имеющей неизвестные БЛ представляет значительные трудности в силу того, что пространственный спектр БЛ лежит в основном в области низких частот.
4. Представленный способ компенсации БЛ опирается на универсальный опорный спектр и не требует дополнительных сведений о характере БЛ.
5. Во всех рассмотренных случаях, АФ восстановление искаженных изображений происходило с качеством, сравнимым с восстановлением при известном амплитудном спектре неискаженного изображения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ФИЛЬТРАЦИЯ ВИНЕРА

В спектральном представлении формула (1) выглядит как алгебраическое уравнение [1]:

$$G(u, v) = A(u, v)F(u, v) + N(u, v), \quad (\text{П. 1})$$

где $G(u, v)$, $F(u, v)$ и $N(u, v)$ – соответственно пространственные спектры изображения $g(x, y)$, объекта $f(x, y)$ и шума $n(x, y)$; $A(u, v)$ – нормированный спектр АФ $a(x, y)$. Под нормированным спектром мы подразумеваем спектр, нормированный так, чтобы его максимальное значение было равно единице.

При выполнении ряда условий [1] решение (П. 1) может быть записано в виде:

$$F(u, v) = \frac{1}{A(u, v)} \frac{|A(u, v)|^2}{|A(u, v)|^2 + K(u, v)},$$

где $K(u, v) = |N(u, v)|^2 / |F(u, v)|^2$, $|N(u, v)|^2$ – энергетический спектр шума, $|F(u, v)|^2$ – энергетический спектр неискаженного изображения. В тех случаях, когда энергетические спектры шума и неискаженного изображения неизвестны, в качестве $K(u, v)$ используют подобранную константу [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
2. Пирогов Ю.А., Тимановский А.Л. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2006. № 1. С. 45.
3. Тимановский А.Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Дис... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. 108 с.
4. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr15/15/text.html>
5. Денисова А.Ю., Сергеев В.В. // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 4. С. 557.
6. Денисова А.Ю., Журавель Ю.Н., Мясников В.В. // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 3. С. 380.
7. Фурсов В.А. // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 878.
8. Рытов С.М., Кравицов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978.
9. Гуляев Ю.В., Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.html>
10. Avciyas I., Sankur B., Sayood K. // J. Electronic Imaging. 2002. V. 11. № 2. P. 206.
11. Wilder W.C. Subjective Relevant Error. Criteria for Pictorial Data Processing. Report TR-EE72-34. West Lafayette: Purdue Univ., 1972.
12. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений. <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>
13. Монич Ю.И., Старовойтов В.В. // Искусственный интеллект. 2008. № 4. С. 376.
14. Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun15/5/text.html>
15. Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В. // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/8/text.html>
16. Зражевский А.Ю., Кокошкин А.В., Коротков В.А. // Журн. радиоэлектроники 2013. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov13/4/text.html>