

УДК 621.396

**СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ПРИ ВАРИАЦИЯХ
УРОВНЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ АППАРАТНОЙ
ФУНКЦИИ**

**А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал**

Статья получена 22 июня 2015 г.

Аннотация. В этой работе проведено сравнение качества восстановления цифровых изображений различными методами. Даже при точно известной аппаратной функции (вместе с боковыми лепестками) у итерационных методов возникают значительные трудности при восстановлении изображений при величине боковых лепестков больших или равных -10 Дб относительно главного лепестка аппаратной функции. При точно известной аппаратной функции уровень боковых лепестков не является препятствием восстановлению изображений методом опорного изображения или фильтрацией по Винеру.

Ключевые слова: восстановление изображений, итерационные методы, метод опорного изображения, фильтр Винера.

Abstract. The comparison of the quality of digital images using various recovery techniques is fulfilled in the work. Even with exactly known apparatus function (with side lobes) of iterative methods there are considerable difficulties in restoring the image in the largest side lobe larger than or equal to -10 dB relative to the main lobe of the apparatus function. When exactly known hardware features side-lobe level is not an obstacle for image reconstruction by the method of the reference image or Wiener filtering.

Key words: image restoration, iterative methods, the method of the reference image, the Wiener filter.

Качество изображения, сформированное оптической системой, сильно зависит от ее аппаратной функции (АФ). Влияние АФ на результаты восстановления зависит от используемого метода восстановления, формы и параметров АФ[1]. В работах [2-6] было рассмотрено восстановление изображения методом опорного изображения (МОИ), основанным на априорной информации о статистических характеристиках спектра изображения и известной аппаратной функции системы. Было показано, что ошибки в оценке формы АФ частично компенсируются используемым методом [3]. Исследование, проведенное в работах [5-6], показало, что наличие боковых лепестков АФ может значительно исказить как спектр АФ, так и спектр искаженного АФ изображения. Использование МОИ может позволить восстановить изображение даже в случае отсутствия информации о боковых лепестках [5-6]. В работах [7-8] исследовалось применение нелинейных итерационных методов. Было показано, что результаты восстановления зависят не только от ошибок в определении уровня боковых лепестков АФ, но и от величины этих лепестков. Целью данной работы является сравнение результатов восстановления искаженного АФ изображения линейными и нелинейными методами.

В качестве оценки количественной меры качества восстановления используем Q_{Af} [5-6], которая является характеристикой того, насколько близко восстановленное изображение к исходному (недоступному при реальных наблюдениях).

$$Q_{Af} = \frac{\|\hat{f} - f\|^2}{\|f\|^2} \quad (1)$$

где f – исходное неискажённое изображение, \hat{f} – восстановленное изображение.

Для исследования влияния уровня боковых лепестков аппаратной функции на увеличение разрешения частично повторим численный эксперимент [5-6] по следующей схеме:

1. выбор тестового изображения, генерация аппаратной функции h с заданным уровнем бокового лепестка α ;
2. решение прямой задачи - моделирование выходного сигнала регистрирующей системы;
3. решение обратной задачи на основе выбранного метода;
4. определение качества Q_{df} полученного изображения;

Для того, чтобы сравнение результатов было сопоставимым друг с другом, используем АФ рис.1 из [5-6]:

$$h = h_1 + \alpha h_2 \quad (2)$$

где: h_1 — функция, описывающая основной лепесток, h_2 — боковой,

$$h_1 = \begin{cases} \cos^2(\pi r / 2r_0), & 0 \leq r < r_0 \\ 0, & r \geq r_0 \end{cases}, \quad h_2 = \begin{cases} \cos^2(\pi r / 2r_0), & r_0 \leq r < 3r_0 \\ 0, & 0 \leq r < r_0, r \geq 3r_0 \end{cases}$$

α - уровень бокового лепестка относительно основного максимума, r_0 — положение нуля между основным и боковым лепестками, т.е. ширина основного лепестка.

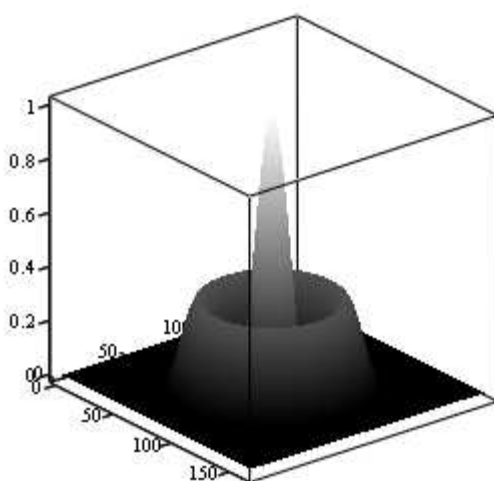


Рис.1. Аппаратная функция для моделирования численного эксперимента.

В качестве исходного изображения можно использовать специальное

тестовое изображение [9], предназначенное для выявления погрешностей восстановления и представленное на рис.2А. На рис.2Б представлено полутоновое исходное изображение, которое мы также будем использовать для оценки качества восстановления и анализа полученных результатов.

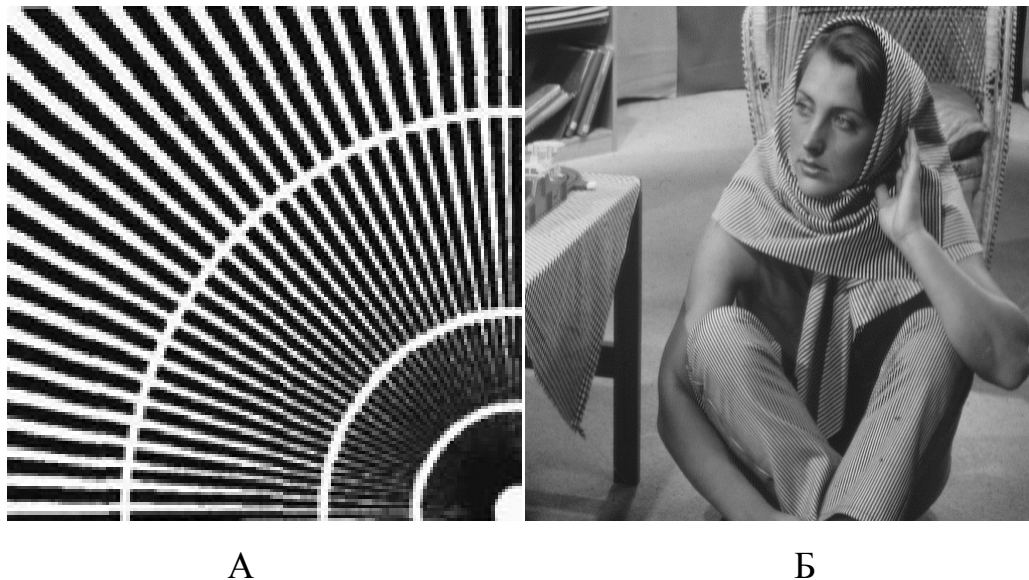


Рис.2. Исходные изображения, черно-белое (169x148) – А, полутоновое (“Барбара” 256x256)– Б.

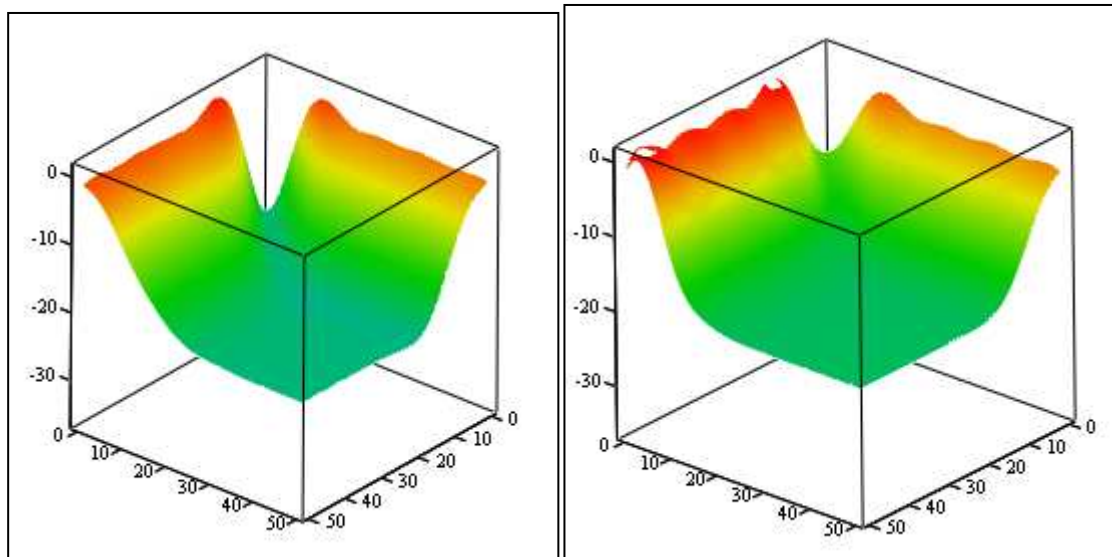
В качестве методов восстановления будем использовать метод опорного изображения (МОИ) [3-6], фильтрация по Винеру с подбором константы K (ФВ) [1], алгоритм восстановления пространства изображения (ISRA) [7-9] и метод Люси-Ричардсона (Л-Р) [7-9].

На рис.3 представлены объемные графики Q_{df} в логарифмическом масштабе в зависимости от коэффициента α (уровня бокового лепестка) для искажающей АФ и АФ, использованной для восстановления изображения. Сравнение графиков на рис.3 позволяет сделать следующие выводы:

- методы, основанные на инверсной фильтрации (МОИ, ФВ), в основном лучше восстанавливают изображение, чем итерационные (ISRA, Л-Р),
- известная искажающая АФ позволяет восстанавливать изображение и в случае АФ со значительным уровнем бокового лепестка (рис.3А, рис.3Б) при использовании МОИ и ФВ,
- результаты восстановления с помощью ISRA и Л-Р зависят от вида АФ, даже если искажающая АФ хорошо известна. Если уровень бокового лепестка

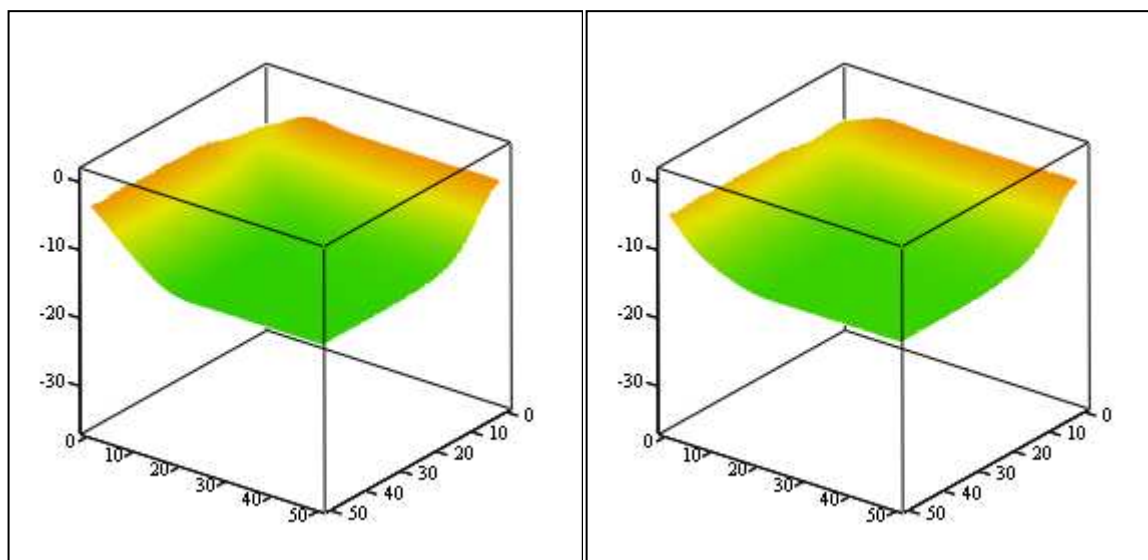
значителен, то использование этих методов может быть нецелесообразным.

- результаты восстановления с помощью ISRA и Л-Р зависят от ширины главного лепестка r_0 . При увеличении r_0 Q_{df} уменьшается (качество восстановления становится хуже).



А

Б



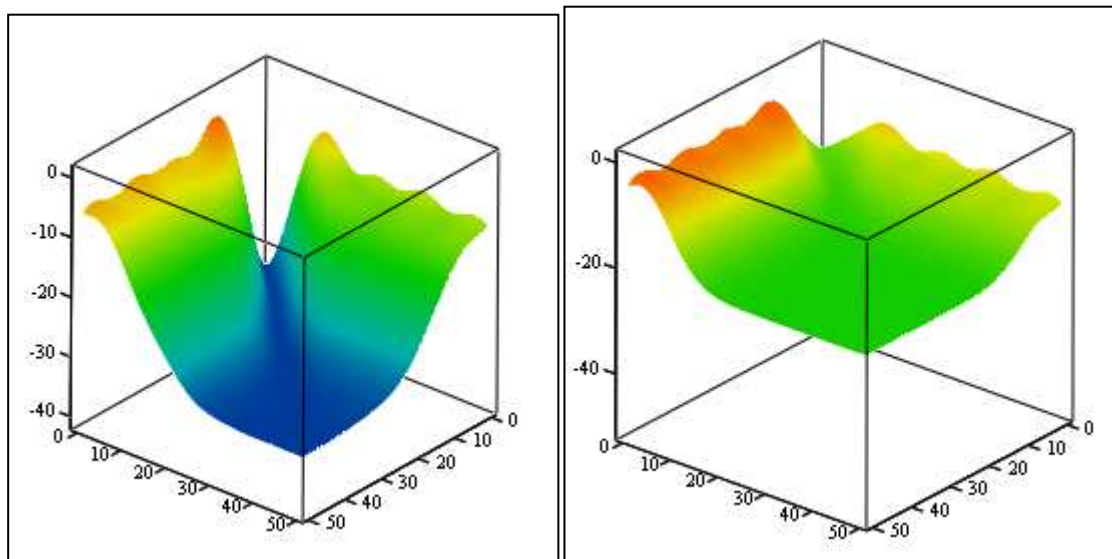
В

Г

Рис.3 Оценка качества восстановления Q_{df} в логарифмическом масштабе в зависимости от коэффициента α (уровня бокового лепестка) для искажающей АФ и АФ, использованной для восстановления изображения. α меняется в диапазоне 0-50дБ. МОИ – А, ФВ – Б, ISRA – В, Л-Р – Г. Исходное изображение представлено на рис.2А. Ширина основного лепестка $r_0=4$.

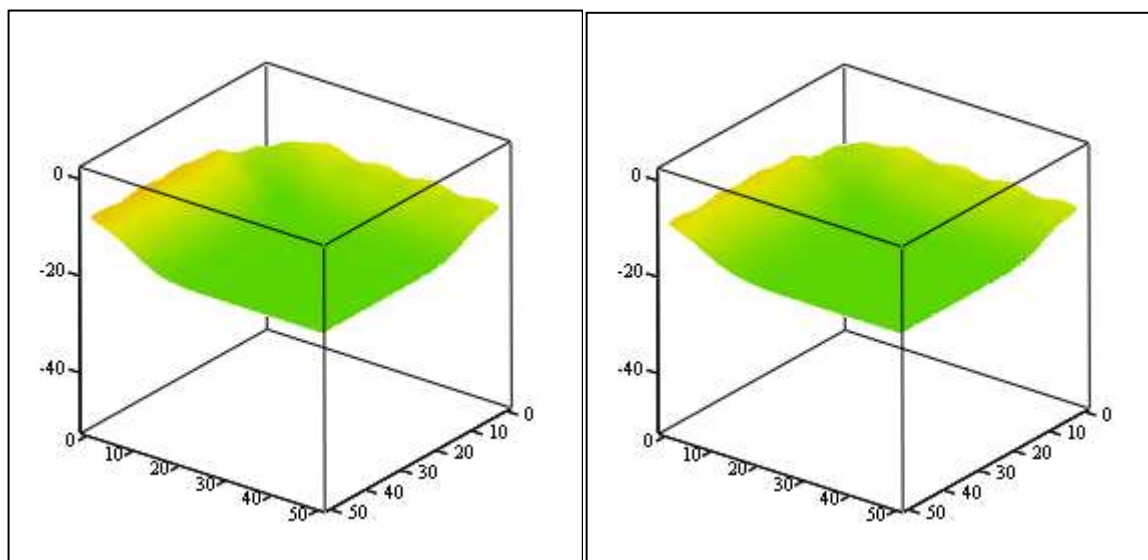
Следует отметить, что эти выводы сделаны в случае черно-белого исходного изображения.

На рис.4 представлены результаты расчетов, аналогичные рис.3, но для случая полутонного изображения рис.2Б.



А

Б



В

Г

Рис.4 Оценка качества восстановления Q_{df} в логарифмическом масштабе в зависимости от коэффициента α (уровня бокового лепестка) для искажающей АФ и АФ, использованной для восстановления изображения. α меняется в диапазоне 0-50дБ. МОИ – А, ФВ – Б, ISRA – В, Л_Р – Г. Исходное изображение представлено на Рис.2Б. Ширина основного лепестка $r_0=4$.

Сравнение Рис.3 и Рис.4 позволяет подтвердить ранее сделанные выводы. Для лучшего понимания приведем на Рис.5 изображения исходное и искаженное, а на Рис.6 - восстановленные вышерассмотренными методами. Ширина основного лепестка $r_0=4$, уровень бокового лепестка при искажении предполагался $\alpha=0.0362$ (-15дБ), а при восстановлении $\alpha=0$ (боковой лепесток отсутствует).



А

Б ($Q_{Af}=-14.66$ дБ)

Рис.5. Исходное – А и искаженное АФ – Б изображения. $r_0=4$, $\alpha=0.0362$ (-15дБ)



А ($Q_{Af}=-20.52$ дБ)

Б ($Q_{Af}=-20.52$ дБ)

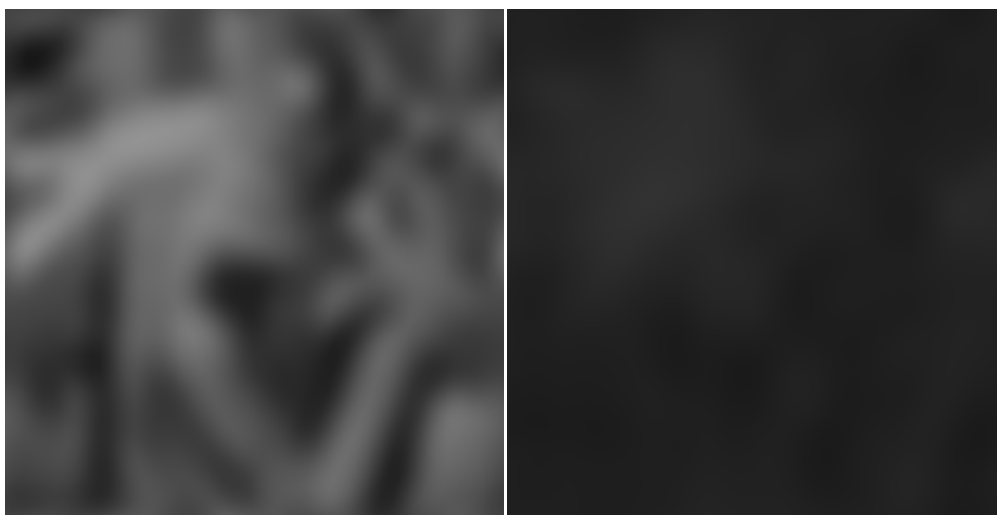
В ($Q_{df}=-16.57$)Г ($Q_{df}=-16.57$)

Рис.6. Восстановленные изображения в предположении отсутствия бокового лепестка. Используемые методы восстановления: МОИ – А, ФВ – Б, ISRA – Д, Люси-Ричардсон – Г.

Сравнение рис.5 и рис.6 показывает, что использование итерационных нелинейных методов не позволило восстановить высокие пространственные частоты (отсутствуют на рис.6В-Г характерные полосы на одежде). С другой стороны видно, что артефакты, присутствующие на рис.6А-Б (соответствующие МОИ и ФВ), на рис.6В-Г (соответствующие ISRA и Люси-Ричардсону) отсутствуют.

Рассмотрим подробнее формирование искаженного изображения. Для большей наглядности возьмем $r_0=20$. Так как искажающая АФ состоит из суммы главного и бокового лепестка, то можно рассчитать искаженное изображение как сумму 2 изображений, сформированных главным и боковым лепестком. Эти изображения представлены на рис.7.

Изображение на рис.7Б более темное, чем остальные, из-за того, что уровень бокового лепестка относительно мал (-15дБ). В силу того, что мы будем полагать при восстановлении АФ состоящей только из главного лепестка, это изображение вызовет появление артефактов на восстановленном изображении. На рис.8 представлены восстановленные МОИ изображения рис.7.



А

Б



В ($Q_{df}=-11.10\text{дБ}$)

Рис.7. Искаженные АФ ($r_0=16$) изображения, сформированные главным лепестком – А, боковым лепестком – Б, их сумма – В.



А

Б



В

Рис.8. Изображения рис.7, восстановленные с помощью МОИ. Обозначения рис.7 и рис.8 соответствуют друг другу.

На рис.8 хорошо видно, что изображение на рис.8А, полученное МОИ из рис.7А, полностью соответствует исходному неискаженному изображению. А артефакты на восстановленном изображении рис.8В соответствуют изображению рис.8Б, полученному из рис.7Б – изображению, сформированному боковым лепестком.

На рис.9 представлены изображения, восстановленные вышерассмотренными методами. Ширина основного лепестка $r_0=20$, уровень бокового лепестка при искажении предполагался $\alpha=0.032$ (-15дБ), а при восстановлении $\alpha=0$ (боковой лепесток отсутствует).



А ($Q_{df}=-16.17$ дБ)



Б $Q_{df}=-14.21$ дБ)

В ($Q_{df}=-13.23$)Г ($Q_{df}=-13.21$)

Рис.9. Восстановленные изображения рис.7В в предположении отсутствия бокового лепестка. Используемые методы восстановления: МОИ – А, ФВ – Б, ISRA – Д, Люси-Ричардсон – Г.

На рис.9 хорошо видно, что методы, основанные на инверсной фильтрации, эффективнее в данном случае нелинейных итерационных методов.

Рассмотрим изменение спектров восстановленных изображений от величины бокового лепестка, который не учитывается при восстановлении. Пусть максимальная возможная амплитуда бокового лепестка равна -15дБ (0.032) относительно главного лепестка. На рис.10 представлены графики диагонального разреза отношения амплитудного спектра восстановленного изображения к амплитудному спектру исходного изображения в зависимости от величины бокового лепестка. Величина бокового лепестка менялась линейно от 0 до 0.032 (-15дБ). Для восстановления использовалась АФ, содержащая только главный лепесток.

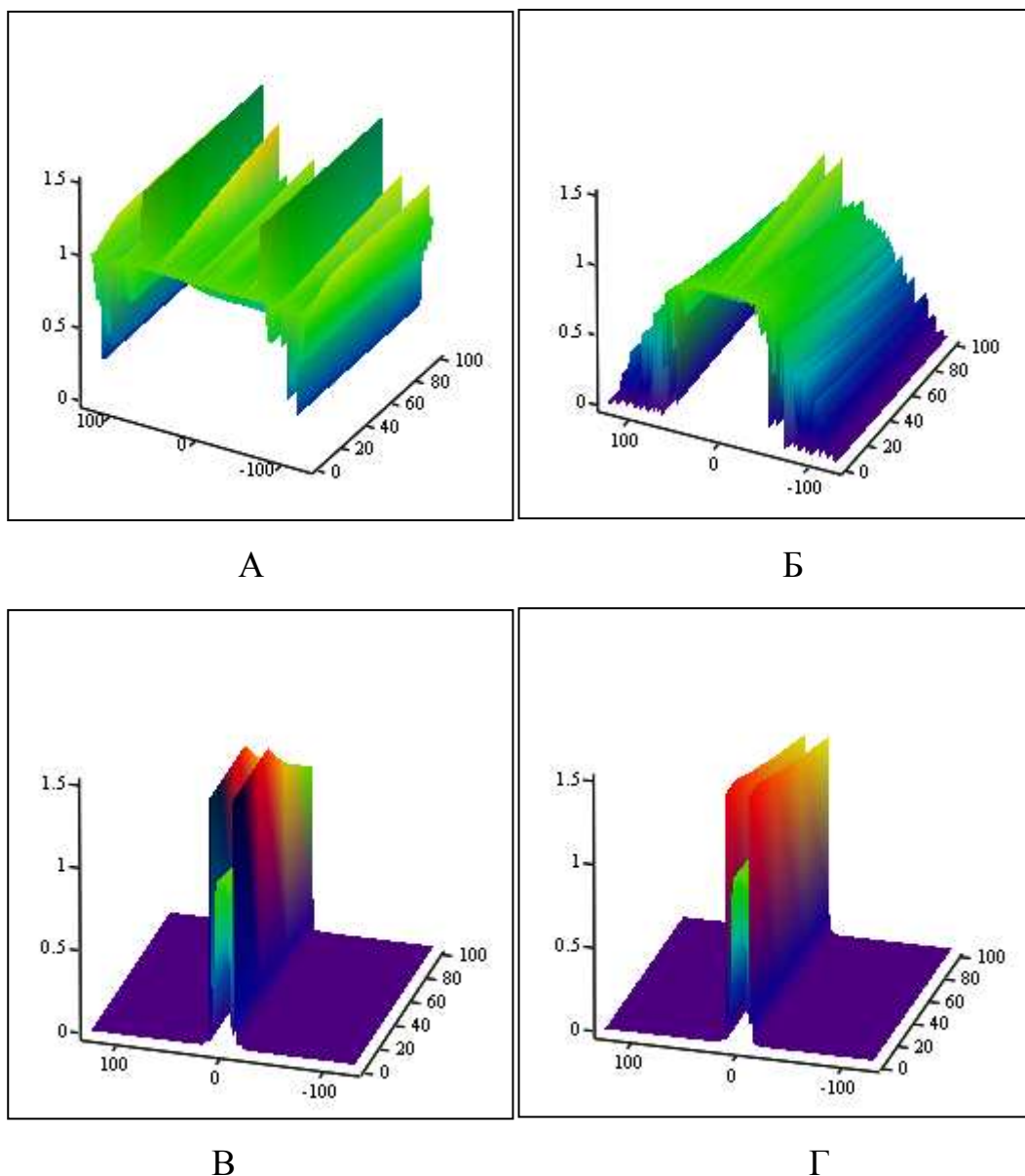
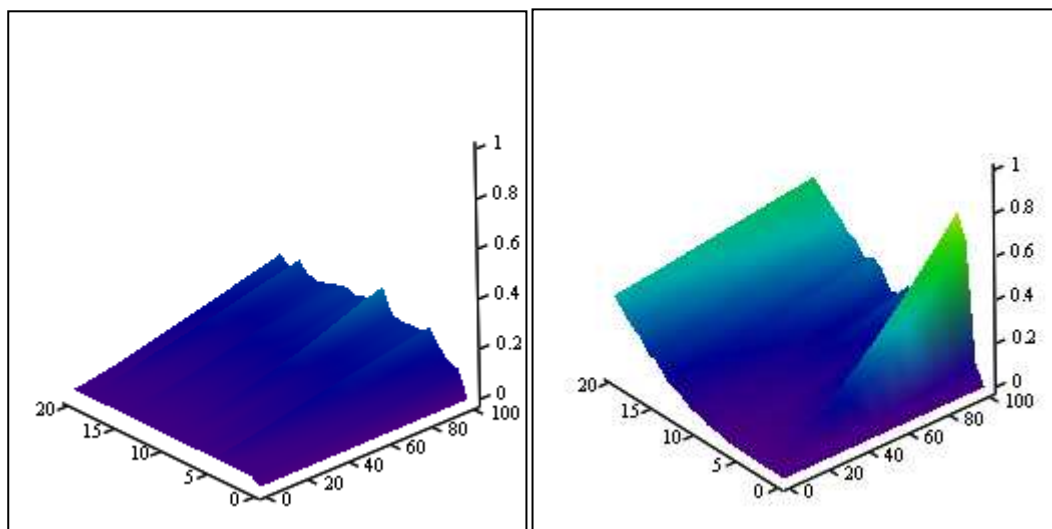


Рис.10. Графики диагонального разреза отношения амплитудного спектра восстановленного изображения к амплитудному спектру исходного изображения в зависимости от величины бокового лепестка. Величина бокового лепестка менялась линейно от 0 до 0.032 (-15дБ). Буквы под рисунками соответствуют методу восстановления: МОИ – А, ФВ – Б, ISRA – В, Люси-Ричардсон – Г. Ширина главного лепестка $r_0=20$.

При идеальном восстановлении отношение спектров изображений восстановленного к исходному равно 1. Чем более это отношение отличается от 1, тем больше потерь информации будет в восстановленном изображении. В отсутствие бокового лепестка, как и ожидалось, МОИ восстанавливает почти

идеально (смотри рис.10А). При увеличении бокового лепестка увеличиваются ошибки восстановления (отклонения от 1 на графике). У фильтрации Винера (рис.10Б) характерное поведение в виде подавления высоких частот проявляется практически одинаково как в отсутствие бокового лепестка, так и при его увеличении. Очевидно поэтому, величина отклонений больше 1 не велика по сравнению с МОИ. Поведение спектров изображений восстановленными нелинейными итерационными методами иное. Восстановления амплитудного спектра изображения вне области низких частот (где спектр АФ заметно больше 0) не произошло. Внутри этой низкочастотной области одни гармоники отношения спектров приближаются к 1 с увеличением бокового лепестка, другие удаляются от 1. Однако на внешнем виде сильно искаженного восстановленного изображения это практически не сказывается, поскольку размеры этой низкочастотной области невелики и подавление высоких частот достаточно сильное (рис.9В-Г).

Для наглядности приведем на рис.11 графики Q_s - среднеквадратичного отклонения отношения спектров восстановленного и исходного изображений в зависимости от ширины главного лепестка и величины бокового лепестка для разных методов восстановления. Величина Q_s лежит в диапазоне от 0 до 1 и характеризует среднеквадратичную величину искажения спектра восстановленного изображения по отношению к неискаженному.



А

Б

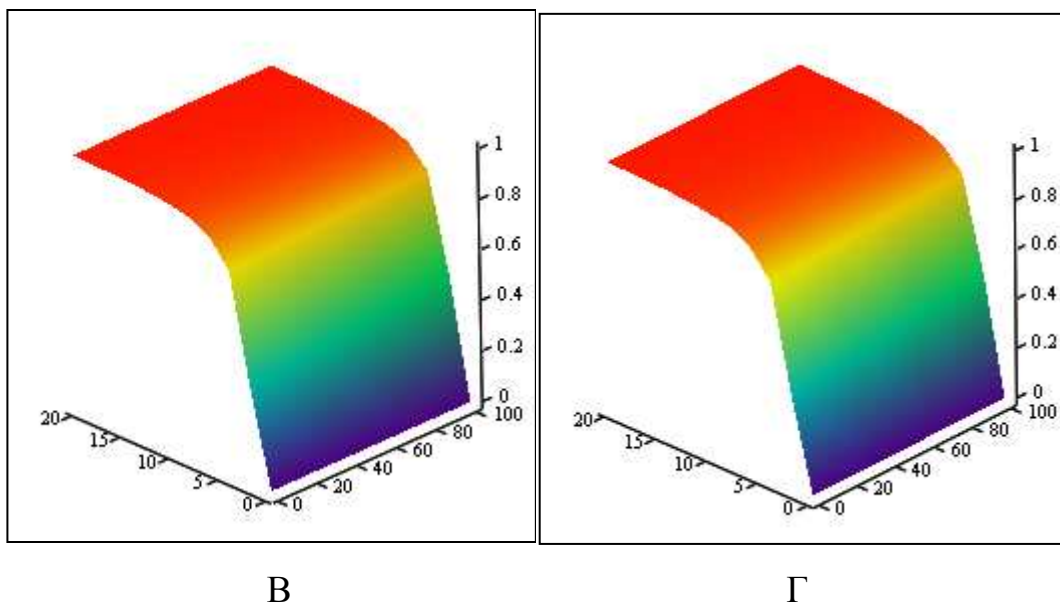


Рис.11. Графики среднеквадратичного отклонения отношения спектров восстановленного и исходного изображений в зависимости от ширины главного лепестка r_0 (0-20) и величины бокового лепестка (0-100%) для разных методов восстановления. МОИ – А, ФВ –Б, ISRA – В, Люси-Ричардсона – Г.

Анализ рис.11 позволяет сделать вывод о том, что МОИ восстанавливает спектр изображения с наименьшими отклонениями. Фильтр Винера тоже достаточно надежно позволяет восстановить спектр изображения. Нелинейные итерационные методы при $r_0 > 5$ не позволяют восстановить спектр изображения при любом уровне бокового лепестка.

Выводы

- Разделение искажающей АФ на известную часть – главный лепесток, и неизвестную часть – боковые лепестки, позволяют выделить и оценить ошибки восстановления изображения, возникающие из-за этой неизвестной части.
- Наличие у искажающей АФ бокового лепестка неизвестных параметров может заметно ухудшить качество восстановленного изображения даже при небольшой амплитуде этого лепестка (например -15дБ).

- Использование итерационных методов (ISRA, Люси-Ричардсона) нецелесообразно при ширине главного лепестка, большей некоторой величины (например $r_0 > 5$ при размере изображения 256x256).
- Фильтрация по Винеру и метод опорного изображения (МОИ) позволяют надежно восстанавливать изображения при большем диапазоне r_0 и величине неизвестного бокового лепестка.
- Даже при точно известной АФ (вместе с боковыми лепестками) у итерационных методов (ISRA, Люси-Ричардсона) возникают значительные трудности при восстановлении изображений при величине боковых лепестков, больших или равных -10Дб относительно главного лепестка АФ.
- При точно известной АФ уровень боковых лепестков не является препятствием восстановлению изображений МОИ или фильтрацией по Винеру.

Литература

1. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. М. «Техносфера», 2005, 1071 стр.
2. А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, Е. П. Новичихин, С. В. Титов, «Повышение качества радиоизображений». «Нелинейный Мир», № 9, 2010г., с. 582-590.
3. Ю. В. Гуляев, А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, В. А. Черепенин «Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 2. Адаптивный метод опорного изображения (АМОИ)». // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/2/text.html>
4. Ю. В. Гуляев, А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, В. А. Черепенин «Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 3. Универсальный опорный спектр. // Журнал радиоэлектроники

[электронный журнал]. 2013. №12.

URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/3/text.html>

5. А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин Влияние уровня боковых лепестков аппаратной функции на качество восстановленного изображения. «Журнал Радиоэлектроники» (<http://jre.cplire.ru>), №4 , 2013г.
6. А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков Влияние уровня боковых лепестков аппаратной функции на качество восстановленного изображения. Часть 2. Спектральный подход. «Журнал Радиоэлектроники» (<http://jre.cplire.ru>), №11 , 2013г.
7. Пирогов Ю.А., Гладун В.В., Тищенко Д.А., Тимановский А.Л., Шлемин И.В, Джен С.Ф., // Сверхразрешение в системах радиовидения миллиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники (<http://jre.cplire.ru>), 2004, №3 – Март.
8. Ю. А. Пирогов, А. Л. Тимановский, Влияние боковых лепестков диаграммы направленности приемной антенны на сверхразрешение в системах пассивного радиовидения, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2006. №1
9. Тимановский А. Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2007.