

УДК 621.396

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ, ИСКАЖЁННОГО СПЕКТРАЛЬНО-ЛОКАЛЬНЫМИ ПОМЕХАМИ И АППАРАТНОЙ ФУНКЦИЕЙ С НЕИЗВЕСТНЫМИ БОКОВЫМИ ЛЕПЕСТКАМИ

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

Статья поступила в редакцию 13 июля 2016 г.

Аннотация. В работе показано, что метод перенормировки с ограничением, в отличие от фильтра Винера, успешно борется со спектрально-локальными помехами и значительно увеличивает качество восстановления изображений, искажённых аппаратной функцией с неизвестными боковыми лепестками.

Ключевые слова: аппаратная функция, неизвестные боковые лепестки, восстановление изображений.

Abstract. In the radio-wave systems there are often situations when the knowledge of the exact shape of the instrumental function (IF) is impossible. This is especially true for the side lobes (SL) of IF. The following objective factors can be the reason of this situation:

- 1) design features of antenna systems which do not allow to carry out a sufficiently accurate three-dimensional measurement of the radiation pattern;
- 2) natural turbulence of the atmosphere, clouds and hydrometeors, causing multipath of the radio wave propagation.

The absence of the necessary information about the side lobes can lead to significant errors when restoring the image distorted by the IF (Instrumental function).

In this work we examine the effect of SL AF as the local spectral interference (LPS). It is shown that the renormalization method with restriction, unlike the Wiener filter, successfully fights with the local spectral interference, and significantly increases the quality of image restoration, distorted by the instrumental function with unknown side lobes.

The following conclusions can be drawn from this study:

1. Using the universal reference spectrum (URS) as a sample of the amplitude spectrum of the undistorted image can effectively filter out the spectral - local interference (SLI).
2. Using the method of renormalization limited (MRL) significantly increases the quality of image restoration, distorted by IF with unknown side lobes (SL).
3. Combined image distortion (IF with unknown SL and SLI) is not an obstacle to the restoration of the image using the MRL.
4. The increase in the amplitude of the SL does not always reduce the quality of image reconstruction using MRL (as opposed to the method of Wiener and methods used in [6-8]).
5. In contrast to other methods, MRL works with obviously more difficult conditions, when the SL energy may exceed the energy of the ML (main lobe) in several times.

Key words: apparatus function, unknown side lobes, image restoration.

В системах радиовидения 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 факторы, как:

- 1) конструктивные особенности антенных систем, не позволяющие провести достаточно точное трёхмерное измерение их диаграммы направленности;
- 2) естественные турбулентность атмосферы, облака или гидрометеоры, вызывающие многолучёвое распространение радиоволн.

Отсутствие необходимой информации о боковых лепестках может приводить к значительным ошибкам при восстановлении искаженного такой аппаратной функцией изображения.

Восстановление изображений, искажённых известной аппаратной функцией (АФ), рассматривалось многими авторами ([1 - 5]). Решение задачи восстановления изображения, искажённого АФ с неизвестными боковыми лепестками (БЛ), рассматривалось авторами [6 - 10] с точки зрения проверки

влияния уровня неизвестных БЛ на качество восстановления изображения различными методами. В частности, в [7] показано, что даже при точно известной аппаратной функции (вместе с боковыми лепестками) наиболее распространённые алгоритмы сверхразрешения, принадлежащие к семейству, основанному на модификации итерационного метода наискорейшего спуска (алгоритм восстановления пространства изображения — ISRA — the image space reconstruction algorithm — и алгоритм Люси-Ричардсона), неприменимы при уровне бокового лепестка выше -10 дБ. При точно известной АФ уровень боковых лепестков не является препятствием восстановлению изображений методом опорного изображения (МОИ) или фильтрацией по Винеру, эти методы позволяют надёжно восстанавливать изображения и при большей величине неизвестного бокового лепестка [9, 18].

Уменьшить влияние неизвестных БЛ АФ на качество восстановления авторами [11] было предложено на основе использования универсального опорного спектра (УОС) [12].

Для оценки степени влияния боковых лепестков (БЛ) на качество восстановления можно использовать два параметра — отношение максимума БЛ АФ к максимуму главного лепестка АФ и суммарный вклад БЛ по отношению к вкладу ГЛ в общее изображение. Заметим, что при относительно небольшом максимуме БЛ их суммарный вклад в формирование изображения может быть весьма значительным и даже превосходить вклад ГЛ.

В данной работе рассматривается действие БЛ АФ как спектрально-локальная помеха (СЛП). Такие помехи могут быть отфильтрованы с помощью секвентного анализа (СА) [13-14], метода опорного изображения (МОИ) [15-16] и метода перенормировки с ограничением (МПО) [17]. Секвентный анализ производится на основе преобразования Уолша, поэтому восстановление искаженного АФ изображения является нетривиальной задачей. Фильтрация СЛП в рамках СА возможна при известных свойствах СЛП, что не всегда приемлемо.

В данной работе, как и ранее [15-17], под спектрально-локальными

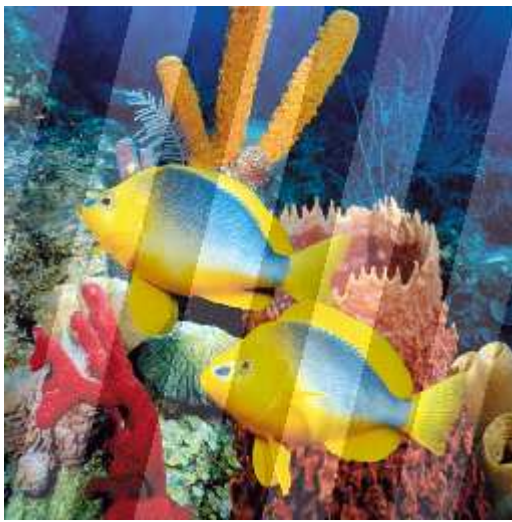
помехами мы полагаем искажения спектра изображения, которые занимают ограниченные области спектра. Понятно, что при этом условии для того, чтобы проявления СЛП были явными, уровень СЛП должен заметно превышать уровень спектра изображения. На использовании этого признака СЛП основано применение МОИ [15-16] и МПО [17]. Ранее [12] предлагалось для уменьшения влияния БЛ фильтровать обозначенную область вблизи 0 с помощью УОС. Однако такой подход не работает для других видов СЛП.

Рассмотрим подробнее фильтрацию СЛП с помощью МПО. Выясним возможность фильтрации влияния БЛ как фильтрацию СЛП. В качестве альтернативы фильтрации спектра изображений используем метод Винера (МВ) [1-5] с подбором параметра. Для тестирования методов выберем модель на основе цветного изображения. Причина такого выбора заключается в том что, поскольку спектр БЛ в основном сосредоточен в области низких пространственных частот, одной из проблем является сохранение (восстановление) общей яркости изображения. А поскольку процедура восстановления обрабатывает каждый цвет отдельно, то правильная цветопередача (цветовая гамма) улучшенного изображения является показателем корректности реализации метода.

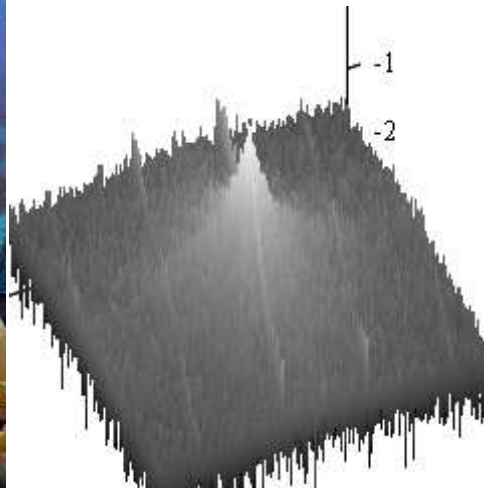
Спектрально-локальные помехи

На рис.1 представлены изображения и их спектры в логарифмическом масштабе при наличии некоторых типов СЛП.

На рис.1 видно, что основная доля энергии представленных СЛП лежит вне области низких частот. Низкие пространственные частоты отвечают за крупномасштабные изменения яркости, за очертания предметов и т.п. Поэтому удаление СЛП, лежащих вне низких частот, обычно не приводит к разрушению изображения и появлению дополнительных артефактов на изображении.



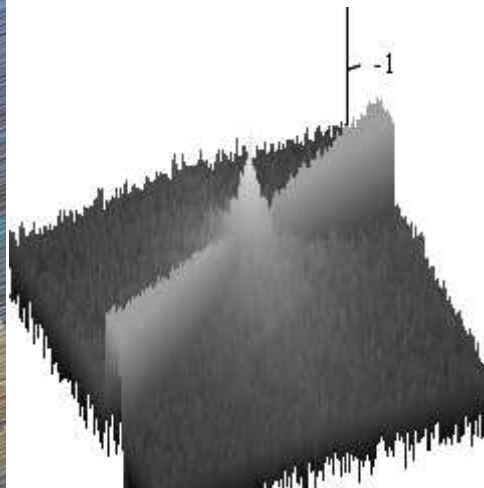
А



Б



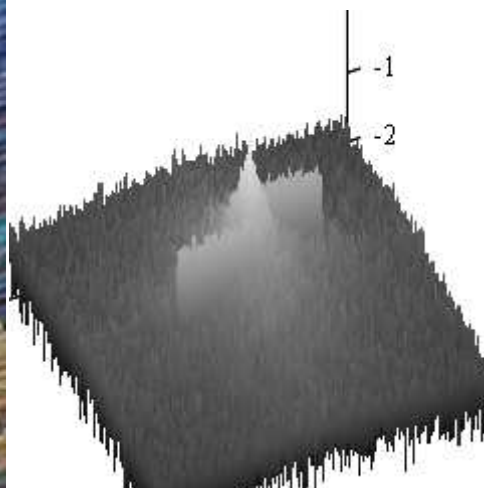
В



Г



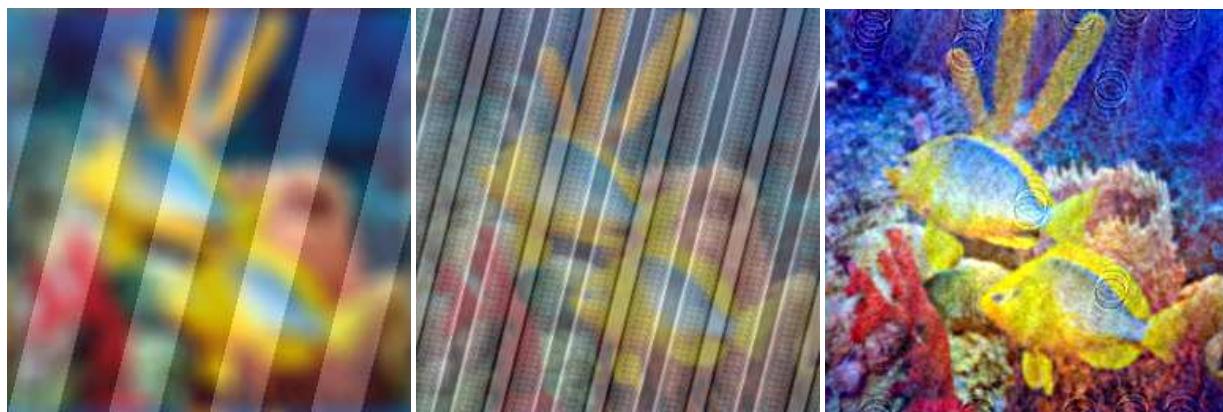
Д



Е

Рис.1. Изображения (А, В, Д) и их спектры (Б, Г, Е) в логарифмическом масштабе при наличии некоторых типов СЛП.

На рис.2А представлено изображение, искаженное АФ (круглое пятно радиусом $S_0=10$) дефокусировки [16] имеющее СЛП в виде полос различной яркости, аналогичных рис.1А. На рис.2Б и рис.2С представлены результаты восстановления с помощью метода Винера (рис.2Б) и МПО (рис.2В).



А

Б

В

Рис.2. А – изображение, искажённое АФ и СЛП; Б – изображение, восстановленное методом Винера; В – изображение, восстановленное МПО.

Изображения на рис.2 показывают, что МПО, в отличие от МВ, с успехом отфильтровывает СЛП и восстанавливает искажённое АФ изображение.

Хорошая фильтрация СЛП с помощью МПО объясняется тем, что перенормировка спектра в значительной мере восстанавливает форму амплитудного спектра, который по условию применения у неискаженного изображения в среднем имеет форму УОС [12].

Восстановление изображений, искажённых АФ с неизвестными боковыми лепестками.

В силу того, что АФ воздействует на изображение как частотный фильтр, полезно рассмотреть спектр АФ при наличии и отсутствии БЛ. Пусть АФ состоит из 2 частей – ГЛ и БЛ. Обе эти части имеют вид цилиндров, у ГЛ высота равна 1, а к БЛ – kb . Радиус оснований цилиндров тоже разный – у ГЛ равен S_0 , а у БЛ в 5 раз больше – $5 S_0$. Вид такой АФ ($S_0=10$, $kb=0.1$)

представлен на рис.3А. Нормированные спектры АФ, ГЛ и БЛ представлены соответственно на рис.3Б, рис.3В и рис.3Г.

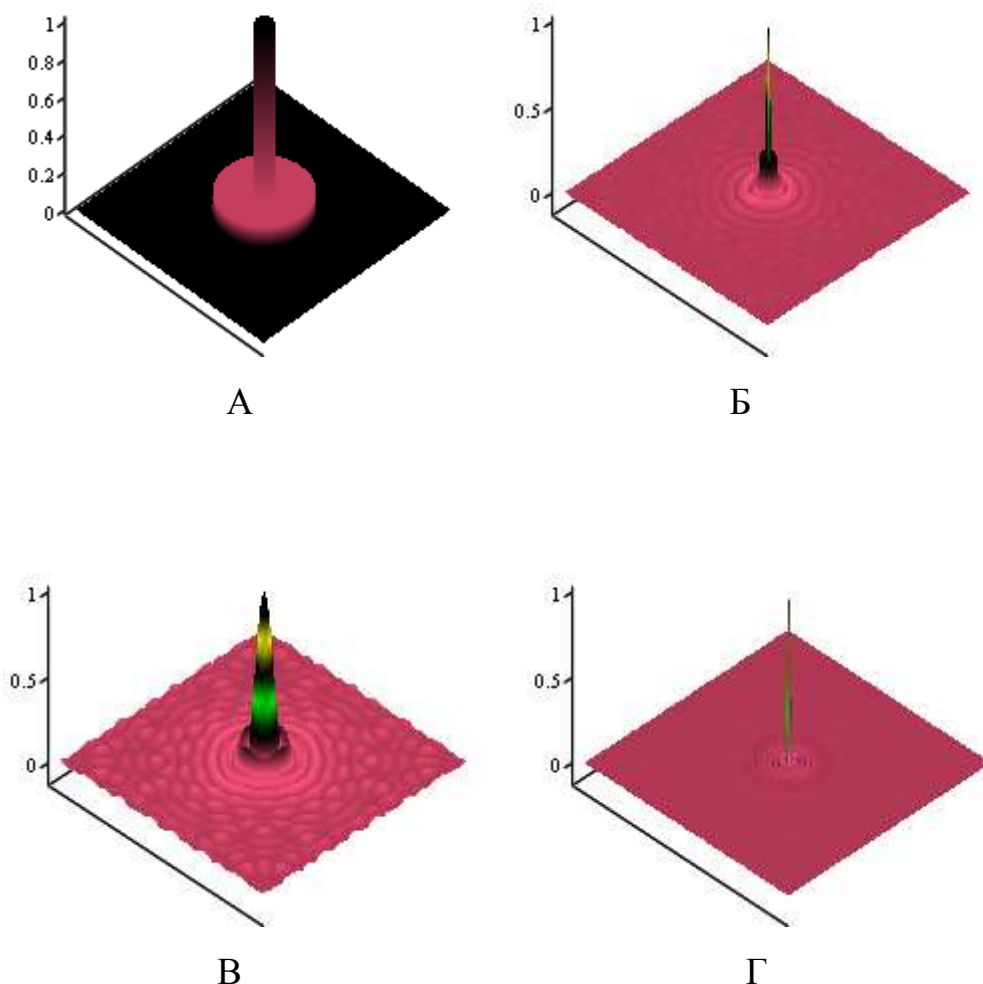


Рис.3. А – общий вид АФ (ГЛ+БЛ) в пространственной области; Б – амплитудный спектр этой АФ; В – амплитудный спектр ГЛ АФ; Г – амплитудный спектр БЛ АФ.

На рис.3 видно, что форма амплитудного спектра АФ (рис.3Б) сильно отличается от формы спектра АФ ГЛ (рис.3В), причём явно видимые отличия сосредоточены в области низких частот. Понятно, что искажённое АФ изображение будет состоять из суммы 2 с соответствующими коэффициентами искажённых отдельно АФ ГЛ и АФ БЛ, приведённых на рис.4.



А

Б

В

Рис.4. А – изображение искажённое АФ (ГЛ+БЛ); Б – изображение искажённое АФ ГЛ; В – изображение искажённое АФ БЛ.

На рис.5 представлены восстановленные из рис.4А с помощью МВ и МПО изображения при условии неизвестных БЛ и известном ГЛ. Следует отметить, что при выбранной АФ отношение вкладов АФ БЛ к ГЛ зависит только от уровня БЛ k_b и не зависит от S_0 . При $k_b=0.1$ это отношение вкладов равно $E=2.4$.



А

Б

В

Рис.5. А – изображение искажённое АФ с $S_0=10$; Б – изображение, восстановленное с помощью МВ; В – изображение, восстановленное с помощью МПО. Восстановление Б и В производилось при известном ГЛ и неизвестных БЛ. $S_0=10$, $k_b=0.1$.

Для сравнения зависимости качества восстановления от S_0 на рис.6

приведены искажённое АФ с $S_0=5$ изображение и восстановленные МВ и МПО изображения.



А

Б

В

Рис.6. А – изображение, искажённое АФ с $S_0=5$; Б – изображение, восстановленное с помощью МВ; В – изображение, восстановленное с помощью МПО. Восстановление производилось при известном ГЛ и неизвестных БЛ. $S_0=5$, $kb=0.1$.

Сравнение рис.5 с рис.6 показывает, что качество восстановления примерно одинаково. Характерный размер артефактов на восстановленных изображениях определяются величиной S_0 .

На первый взгляд, кажется, что увеличение величины kb – амплитуды БЛ влечёт за собой уменьшение качества изображения. Следует отметить, что увеличение амплитуды БЛ, конечно же, при прочих равных условиях увеличивает вклад БЛ в формирование искажённого изображения. Однако не следует забывать и то, что АФ при формировании изображения исполняет роль частотного фильтра. А это значит, что для определённых видов АФ увеличение kb может приводить не только к увеличению вклада БЛ в изображение, но и вызывать увеличение полосы пропускания АФ как частотного фильтра.

Рассмотрим АФ, состоящую из суммы:

$$AF(r) = AFg(r) + kbAFb(r), \quad (1)$$

главного лепестка:

$$AFg(r) = \left[\frac{\sin(\pi r / S0)}{\pi r / S0} \right]^2, \text{ при } r \leq S0 \text{ и } AFg(r) = 0, \text{ при } r > S0; \quad (2)$$

и боковых лепестков:

$$AFb(r) = 0, \text{ при } r \leq S0 \text{ и } AFb(r) = \left[\frac{3\pi \sin(\pi r / S0)}{2\pi r / S0} \right]^2, \text{ при } r > S0, \quad (3)$$

где r - модуль радиус вектора, $S0$ - характерный радиус пятна АФ, kb - амплитуда БЛ.

Если выбрать в качестве значений параметров этой АФ $kb = 0.0473, S0 = 10$, то искажённое изображение, восстановленные изображения с помощью МВ и МПО и известного ГЛ будут выглядеть как представленные на рис.7.



А

Б

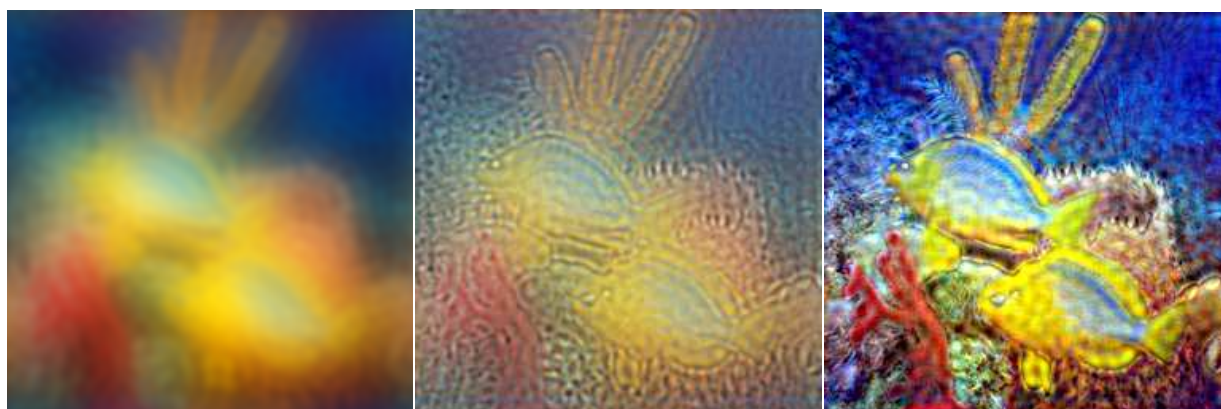
В

Рис.7. А – изображение, искажённое АФ с $S0=10$; Б – изображение, восстановленное с помощью МВ; В – изображение, восстановленное с помощью МПО. Восстановление производилось при известном ГЛ и неизвестных БЛ. $S0=10, kb=0.0473$.

На рис.7 видно, что, несмотря на относительно небольшую амплитуду БЛ и сравнимый вклад БЛ по отношению к ГЛ ($E=1.09$), восстановленные изображения невысокого качества, мелкие детали изображения практически отсутствуют.

Увеличим амплитуду БЛ – пусть $kb=0.3$. Искажённое изображение АФ с

такими параметрами представлено на рис.8А. Восстановленные МВ и МПО изображения представлены на рис.8 Б и В соответственно.



А

Б

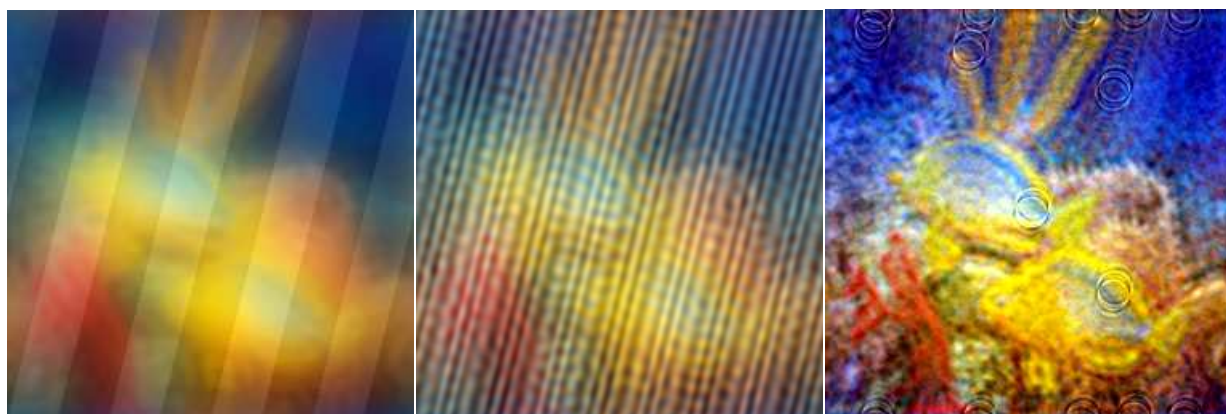
В

Рис.8. А – изображение, искажённое АФ с $S_0=10$; Б – изображение, восстановленное с помощью МВ; В – изображение, восстановленное с помощью МПО. Восстановление производилось при известном ГЛ и неизвестных БЛ. $S_0=10$, $kb=0.3$.

Сравнение рис.7 и рис.8 позволяет сделать вывод о том, что в данном случае увеличение амплитуды, а, следовательно, и вклада БЛ привело к увеличению как искажения изображения (рис.7А и рис.8А), так и качества восстановления МПО (рис.7В и рис.7В). В то же время увеличение амплитуды БЛ привело к снижению качества восстановления МВ в условиях неизвестных БЛ.

Комбинация искажений изображения: АФ с неизвестными БЛ + СЛП

Интересен случай восстановления изображения, искажённого как СЛП, так и АФ с неизвестными БЛ. На рис.9А представлено искажённое изображение, как АФ с $S_0=10$, так и СЛП. На рис.9Б и рис.9В представлены соответственно изображения, восстановленные МВ и МПО.



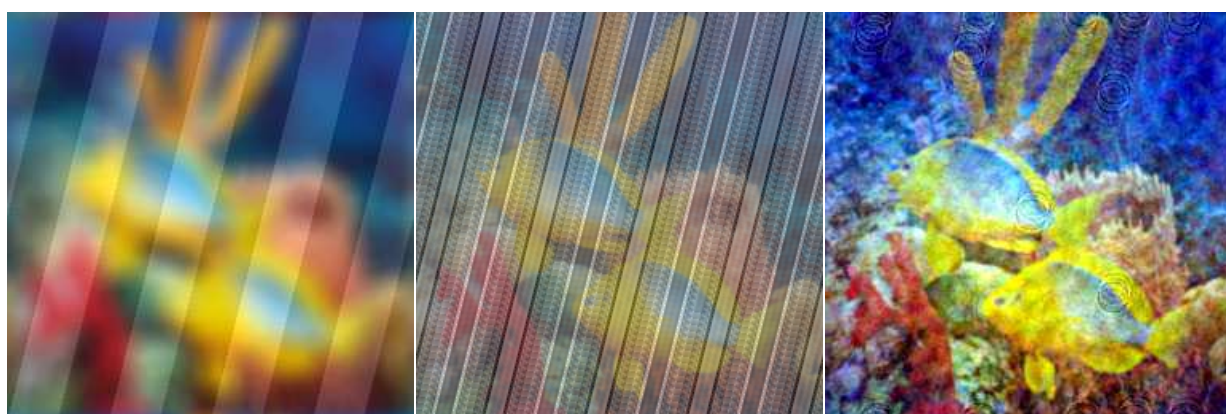
А

Б

В

Рис.9. А – изображение искажённое АФ (1)-(3) с $S_0=10$ и СЛП; Б – изображение восстановленное МВ; В – изображение восстановленное МПО. Восстановление производилось при известном ГЛ и неизвестных БЛ. $S_0=10$, $kb=0.3$.

Сравнение изображений на рис.7 – 9 позволяет сделать вывод о том, что добавление к неизвестным БЛ СЛП вызывает дополнительное снижение качества восстановления МПО – (рис.8В и рис.9В). Однако снижение качества зависит от свойств АФ и СЛП. На рис.10 приводятся изображения, аналогичные изображениям рис.9. Отличаются эти рисунки тем, что рис.9 касается АФ, описываемой формулами (1) – (3). Тогда как изображения на рис.10 получены с использованием АФ, изображённой на рис.3.



А

Б

В

Рис.10. А – изображение, искажённое АФ (рис.3) с $S_0=10$ и СЛП; Б – изображение, восстановленное МВ; В – изображение, восстановленное МПО. Восстановление производилось при условии известном ГЛ и неизвестных БЛ. $S_0=10$, $kb=0.1$.

Сравнение результатов восстановления рис.5В, рис.9В и рис.10В позволяет сделать вывод о том, что заметного снижения качества восстановления с помощью МПО при добавлении искажений к АФ ещё и СЛП может и не произойти (рис.5В и рис.10В). На наш взгляд на снижение качества восстановления оказывает большое влияние ограничение высоких частот АФ, например АФ, определяемой выражениями (1) – (3).

Выводы.

1. Использование универсального опорного спектра (УОС) в качестве образца амплитудного спектра неискаженного изображения позволяет эффективно отфильтровывать спектрально – локальные помехи (СЛП) [16-17].
2. Использование метода перенормировки с ограничением (МПО) [17] значительно увеличивает качество восстановления изображений, искажённых АФ с неизвестными боковыми лепестками (БЛ).
3. Комбинированное искажение изображения (АФ с неизвестными БЛ и СЛП) не является препятствием для восстановления изображения с помощью МПО.
4. Увеличение амплитуды БЛ не всегда уменьшает качество восстановления изображения с помощью МПО (в отличие от метода Винера и методов, использованы в работах [6-8]).
5. В отличие от других методов, МПО работает при заведомо более тяжёлых условиях, когда энергия БЛ может превосходить энергию ГЛ в несколько раз.

Литература

1. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. М. «Техносфера» , 2005, 1071 стр.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. - Методы решения некорректных задач. М.Наука, 1979.
3. Pratt W.K. Digital Image Processing. – John Wiley and Sons, Inc., USA, 1978.

4. Бейтс Р. Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. /Пер. с англ.к. ф-м н. Б.С. Кругликова и С.Л. Ярославского под редакцией д. ф-м н. Л.П. Ярославского. М.: «Мир», 1989, 487с.
5. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений. URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>
6. 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 [электронный журнал]. 2004. №3, – Март. URL:<http://jre.cplire.ru/jre/mar04/3/text.html>
7. Ю. А. Пирогов, А. Л. Тимановский, Влияние боковых лепестков диаграммы направленности приёмной антенны на сверхразрешение в системах пассивного радиовидения, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2006. №1
8. А.Л. Тимановский. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. 2007.
9. А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин Влияние уровня боковых лепестков аппаратной функции на качество восстановленного изображения. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. №4 , URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/8/text.html>
10. 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 [электронный журнал]. 2013. №11, URL:<http://jre.cplire.ru/jre/nov13/4/text.html>
11. А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин «Уменьшение влияния неизвестных боковых лепестков искажающей аппаратной функции на качество восстановления радиоизображения». Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. №4, 2015, URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr15/15/text.html>

12. Ю. В. Гуляев, А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, В. А. Черепенин «Коррекция пространственного спектра, искажённого 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>
13. В. А. Саблина «Разработка и исследование алгоритмов восстановления изображений методами секвентного анализа». Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Рязань, 2009.
14. Б. В. Костров «Теория и методология применения секвентного анализа для обработки аэрокосмических изображений». Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Рязань, 2012.
15. Ю. В. Гуляев, А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, В. А. Черепенин «Коррекция пространственного спектра, искажённого 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>
16. А. Ю. Зражевский, А. В. Кокошкин, В. А. Коротков Влияние спектрально-локальных помех на восстановление изображения методом опорного изображения. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. №1, 2014, URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jan14/9/text.html>
17. А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин Использование метода перенормировки с ограничением для восстановления искаженных изображений при наличии помех и шума с неизвестными параметрами. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. №7, 2015, URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jul15/4/text.html>
18. А. В. Кокошкин, В. А. Коротков, К. В. Коротков, Е. П. Новичихин Сравнение качества восстановления цифровых изображений различными методами при вариациях уровня боковых лепестков аппаратной функции. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. №7, 2015, URL: <http://jre.cplire.ru/iso/jul15/5/text.html>