

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.4>

УДК: 621.397

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ БОРЬБЫ СО СПЕКТРАЛЬНО-ЛОКАЛЬНЫМИ ПОМЕХАМИ

А.В. Кокошкин

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 25 октября 2024 г.

Аннотация. В предложенной работе, применительно к задачам дистанционного зондирования, анализируются методы обработки цифровых изображений способные в автоматическом режиме устранять спектрально-локальные помехи. Используются: метод перенормировки с ограничением, метод опорного изображения и, предложенная недавно, модификация фильтра Винера на основе метода опорного изображения. С помощью процедуры дефокусировки, с последующим наложением спектрально-локальной помехи и дополнительных шумов, моделируется подобие искаженного радиоизображения. Сравнение эффективности методов восстановления изображений производится как по экспертным оценкам, так и по объективным критериям (метрикам) качества.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, обработка изображений, фильтр Винера, метод опорного изображения, спектрально-локальные помехи, модификация фильтра Винера на основе метода опорного изображения.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Кокошкин Александр Владимирович, shvarts65@mail.ru

Введение

Применительно к задачам дистанционного зондирования всегда актуальным является повышение эффективности способов восстановления изображений [1, 2]. Из-за физических особенностей присущих, например, системам радиовидения миллиметрового диапазона радиоволн, пространственное разрешение изображений часто оказывается недостаточным для достоверной идентификации объектов. По этой тематике, в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, на протяжении ряда лет, разрабатываются разнообразные методы, которые позволяют решать подобные задачи [3-7]. В частности, эта работа является продолжением предыдущей [8], в которой была предложена модификация фильтра Винера на основе метода опорного изображения. Кроме того, что искажающая аппаратная функция (АФ) (в радиодиапазоне – диаграмма направленности антенной системы) существенно понижает возможности распознавания элементов изображения, в определенных случаях есть вероятность возникновения так называемых – спектрально-локальных помех. А это, в свою очередь, приводит к сбою в работе некоторых широко применяемых методов реконструкции изображений (например, фильтр Винера (ФВ)). Из предыдущих публикаций процитируем: «Спектрально-локальными помехами называются искажения спектра изображения, которые занимают ограниченные области пространственного спектра. Причем уровни амплитуд гармоник спектра этих помех существенно превосходят близлежащие амплитуды спектра неискаженного (идеального) изображения. Причиной подобных помех могут быть как особенности записывающей данные аппаратуры (в том числе сбой в ее работе), так и атмосферные явления (дождь, снег, неоднородность атмосферы)».

Здесь проводится сравнительный анализ эффективности нового метода (модифицированного фильтра Винера (МФВ)) с другими, обладающими способностью в автоматическом режиме, бороться со спектрально-локальными помехами. Это метод перенормировки с ограничением (МПО) [7], адаптивный метод опорного изображения (АМОИ) [3-6, 8]. При одинаковых исходных

условиях искажений (аппаратная функция (АФ), спектрально-локальная помеха и наложение дополнительных аддитивных шумов), проверяется качество восстановления изображений. Кратко напомним основной физический смысл работы используемых методов.

АМОИ, после инверсной фильтрации, удаляет выбросы амплитудных гармоник пространственного спектра таким образом, чтобы они укладывались в заданные пределы вокруг модели универсального опорного спектра (УОС) [6], который является усредненной моделью спектра изображения «хорошего» качества [3-6, 8].

МПО перенормирует пространственный спектр после инверсной фильтрации таким образом, чтобы, среднее значение восстановленного спектра соответствовало УОС. При этом, как и в АМОИ, амплитуды гармоник должны укладываться в заданные пределы вокруг УОС [7].

ФВ рассматривает изображение и шум как случайные переменные, в результате его применения вычисляется такая оценка для неискаженного изображения, чтобы ошибка (средний квадрат отклонения между неискаженным изображением и его оценкой) было минимальным [1].

МФВ сочетает в себе как свои традиционные возможности (хорошо справляется с восстановлением изображений искаженных известными аппаратной функцией и шумом), так возможности АМОИ включая способность подавления спектрально-локальных помех [8].

1. Сравнительный анализ

Сравнение работы методов начинается с создания тестового изображения. С помощью процедуры дефокусировки (АФ «круглое пятно» радиус $S_0 = 6$), моделируется подобие радиотеплового портрета объекта. В качестве «исходного» используем фрагмент фото «Танк Abrams наехал на машину» (<https://topwar.ru/15631-v-ssha-prohodyat-diskussii-o-celesoobraznosti-dalneyshey-zakupki-tankov-abrams.html>) (рис. 1а). После размытия искажающей аппаратной

функцией на тестовый образец накладываем спектрально-локальную помеху «полосы» (рис. 1б).



Рис. 1. Исходное оптическое изображение – а);
Модель радиоизображения со спектрально-локальной помехой – б).

На рис. 2 показаны амплитудные пространственные спектры (в логарифмическом масштабе) соответствующие изображениям рис. 1. На рис. 3 изображаются результаты реконструкций разными методами тестового изображения рис. 1б при отсутствии дополнительного аддитивного шума. Рис. 4 иллюстрирует, соответствующие рис. 3, амплитудные пространственные спектры (в логарифмическом масштабе) восстановленного разными методами тестового изображения. Голубым цветом показаны уровни ограничения сверху и снизу по амплитуде (на основе УОС). При внимательном изучении рис. 3 (экспертная оценка), можно утверждать о том, что все методы, кроме классического фильтра Винера (рис. 3в), справляются с задачей реконструкции. Необходимо заметить, что результат восстановления по методу перенормировки с ограничением (рис. 3а) выглядит немного менее контрастным по сравнению с двумя другими успешными результатами (АМОИ – рис. 3б, МФВ – рис. 3г). Объяснить это можно тем свойством МПО, что среднее значение восстановленного спектра соответствует УОС (рис. 4а). При незначительном снижении контраста МПО снижает уровень паразитных артефактов в реконструированном изображении.

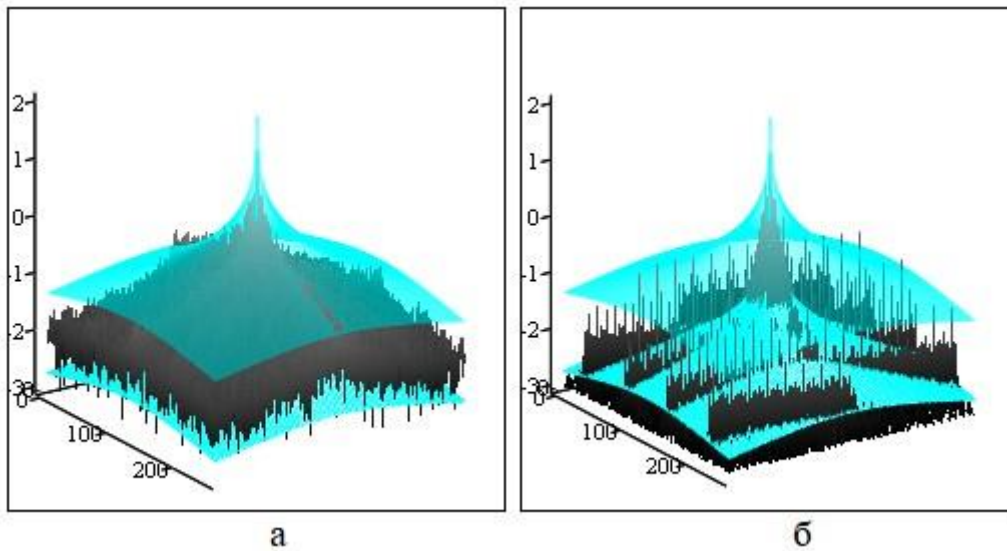


Рис. 2. Амплитудные пространственные спектры в логарифмическом масштабе. Спектр исходного изображения рис. 1а – а); Спектр тестовой модели (дефокусировка плюс спектрально-локальная помеха) – б).

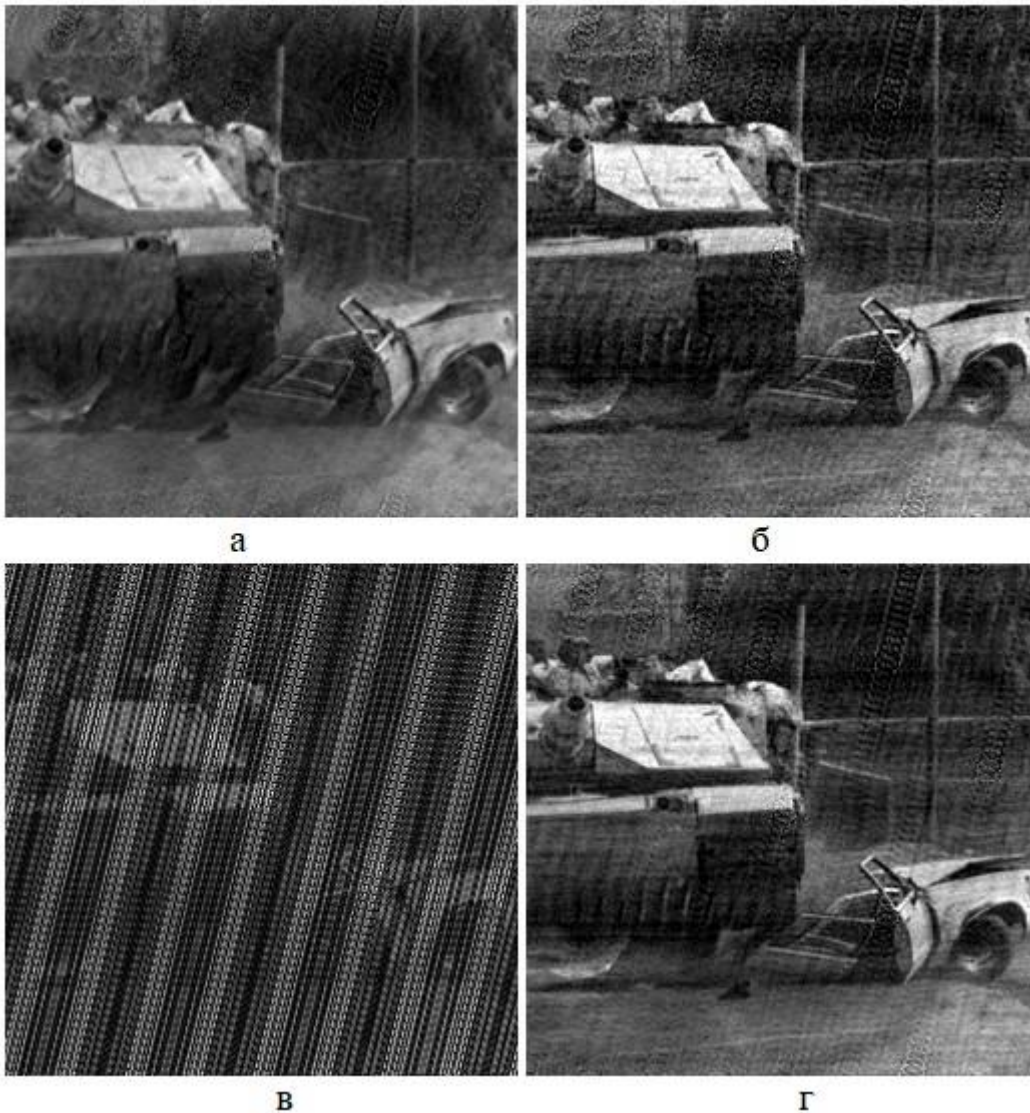


Рис. 3. Восстановление изображения рис. 1б (шум отсутствует) с помощью: МПО – а); АМОИ – б); ФВ – в); МФВ – г).

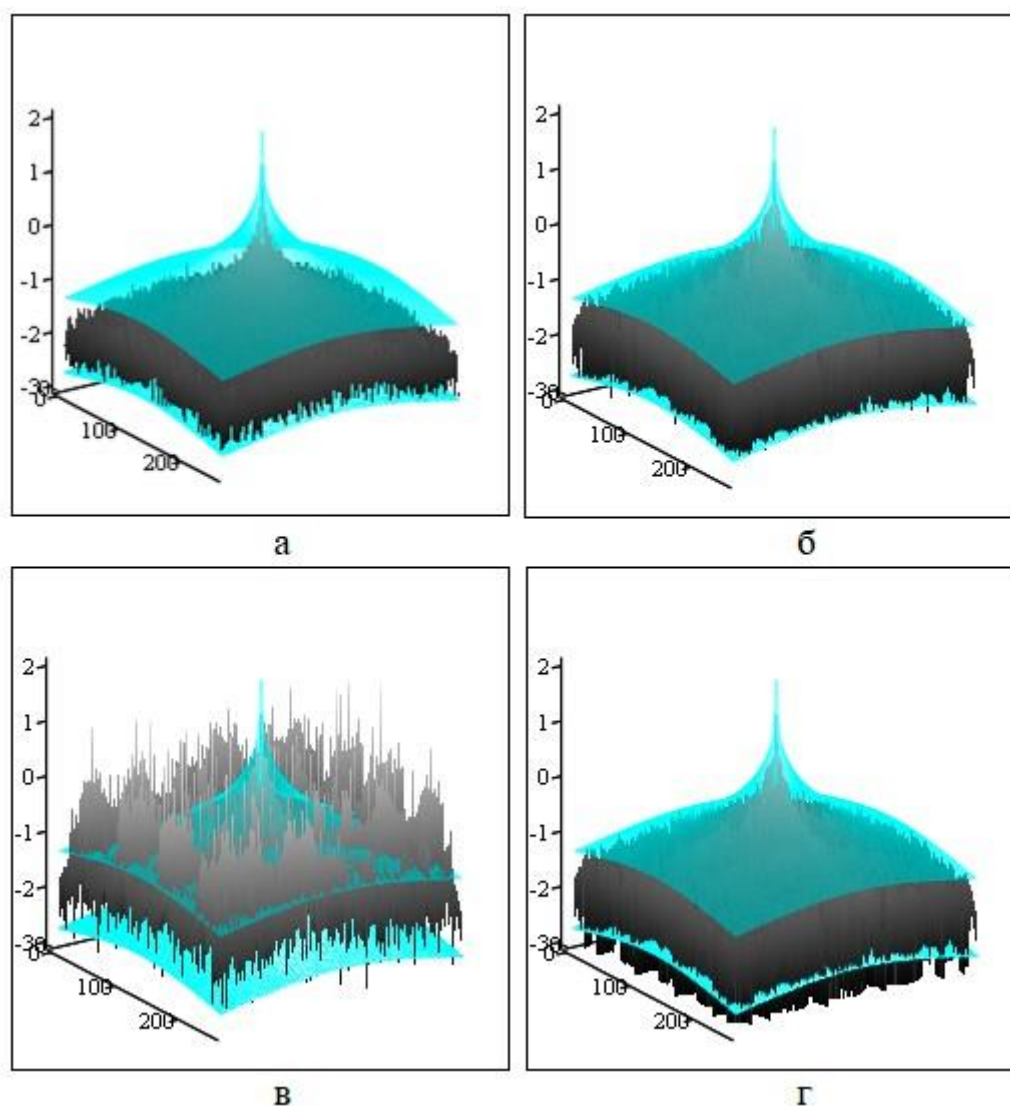


Рис. 4. Пространственные амплитудные спектры восстановлений изображения рис. 1б (шум отсутствует) (соответствуют изображениям рис. 3) с помощью: МПО – а); АМОИ – б); ФВ – в); МФВ – г). Голубым цветом показаны уровни ограничения сверху и снизу по амплитуде (на основе УОС).

Сравнение было бы не полным без проверки на устойчивость к шумам. Для дальнейшего анализа на тестовое изображение рис. 1б наложим аддитивный равномерно-случайный шум амплитудой равной одному проценту от 256 (максимальной яркости 8-и битного изображения). Таким образом, отклонение каждого пикселя изображения, связанное с шумом, как в большую, так и в меньшую сторону может составлять до 2.56 условных градаций яркостей. Рис. 5 демонстрирует восстановление разными методами зашумленного модельного изображения рис. 1б.

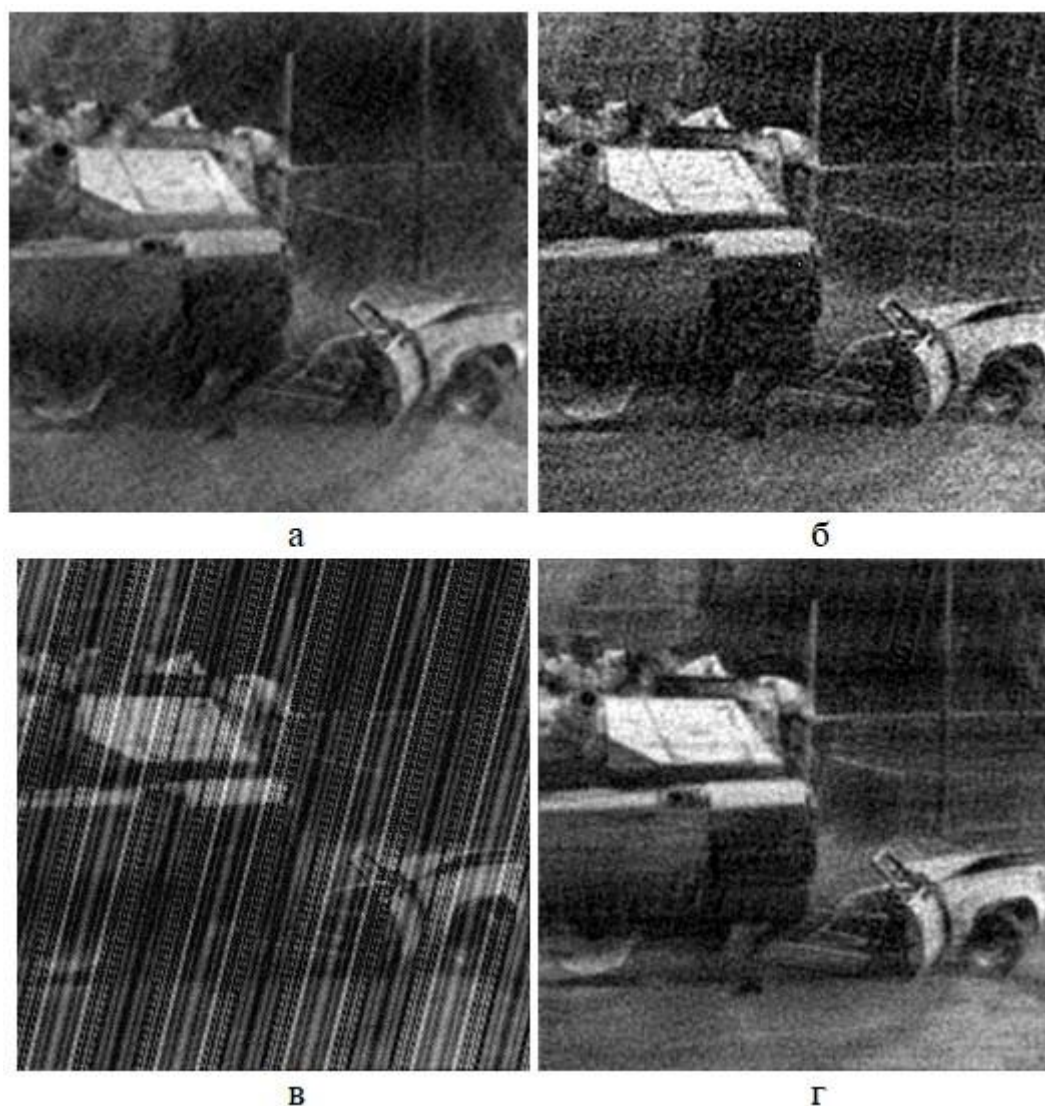


Рис. 5. Восстановление изображения рис. 1б (шум амплитудой 2.5б) с помощью: МПО – а); АМОИ – б); ФВ – в); МФВ – г).

При внимательном изучении рис. 5 (экспертная оценка) можно отметить, что все методы, кроме классического ФВ, удовлетворительно справляются с задачей восстановления. Причем реконструкция МПО (рис. 5а), как и в случае отсутствия шума, имеет более низкий контраст по сравнению с конкурентами. А изображение, полученное с помощью МФВ (рис. 5г) имеет и приемлемую четкость (контрастность) и более низкий, чем у АМОИ (рис. 5б) уровень мешающих артефактов (шероховатостей). Таким образом, по экспертной оценке победителем в соревновании можно считать модифицированный фильтр Винера.

Рис. 6 иллюстрирует, соответствующие рис. 5, амплитудные пространственные спектры (в логарифмическом масштабе) восстановленного

разными методами тестового изображения с равномерным шумом амплитудой 2.56 условных градаций яркостей.

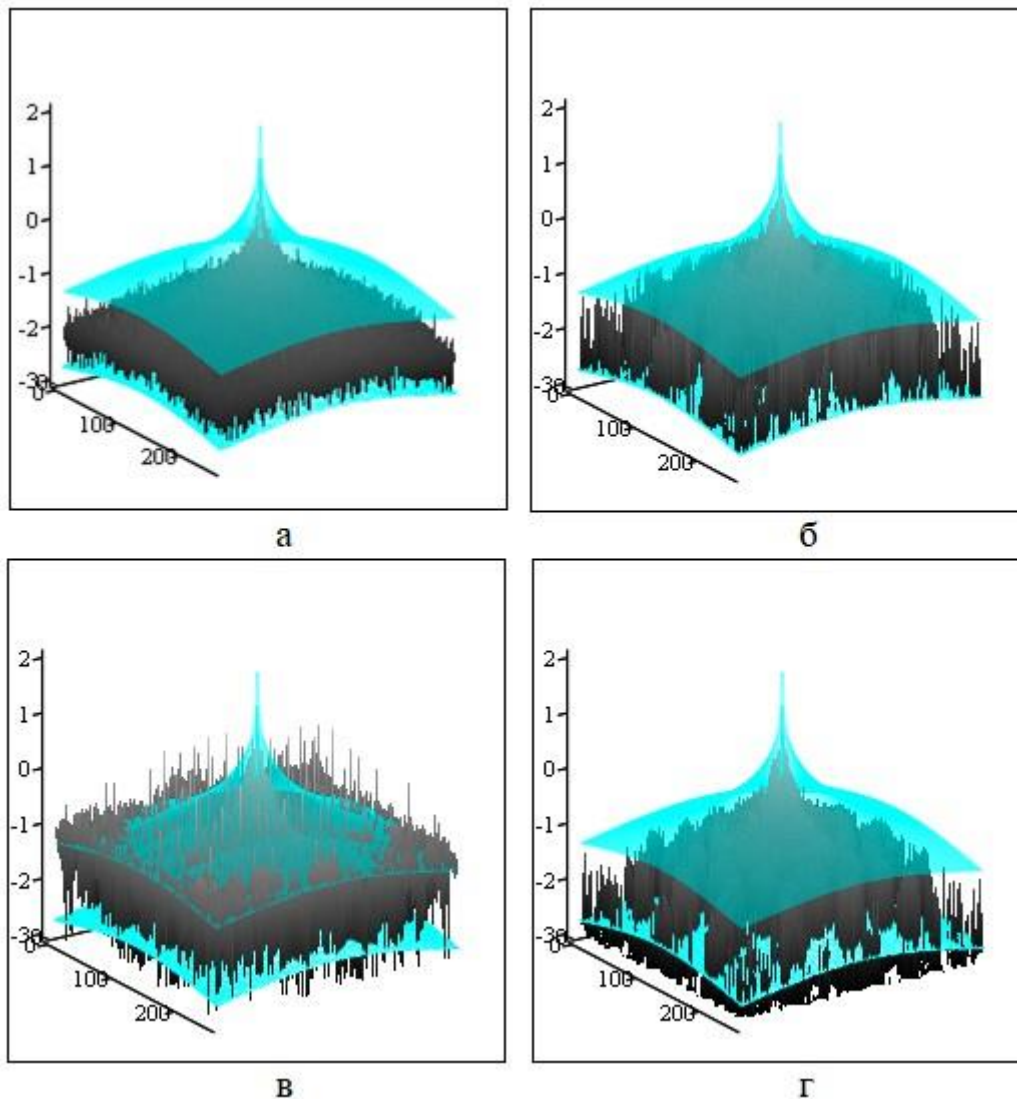


Рис. 6. Пространственные амплитудные спектры восстановлений изображения рис. 1б (шум амплитудой 2.56) (соответствуют изображениям рис. 3) с помощью: МПО – а); АМОИ – б); ФВ – в); МФВ – г). Голубым цветом показаны уровни ограничения сверху и снизу по амплитуде (на основе УОС).

В таблице 1 показаны вычисленные метрики качества восстановленного разными методами тестового изображения. Расчеты проводились в соответствии с работами [9-12]. Вычислялись: мера структурного подобия (МСП), средний контраст, СКО от «идеала» (среднеквадратичное отклонение попиксельной разницы между эталонным и реконструированным изображением), мера гистограммного подобия, мера спектрального подобия, СКО разности фазы (с эталонным спектром). Желтым цветом в табл. 1 выделены показатели для реконструкций зашумленного тестового

изображения. Для классического фильтра Винера метрики не вычислялись, поскольку он, как видно из рисунков выше, не справляется с задачей подавления спектрально-локальной помехи.

Таблица 1. Объективные критерии (метрики) качества восстановленного разными методами тестового изображения «Танк».

Изображение	Шум	Мера структурного подобия	Средний контраст	СКО от «идеала»	Мера гистограммного подобия	Мера спектрального подобия	СКО разницы фазовых спектров
«идеальное»	0	1	0.140	0	1	1	0
МПО	0	0.920	0.154	19.427	0.868	0.928	1.452
	2×2.56	0.900	0.190	21.768	0.858	0.918	1.976
АМОИ	0	0.951	0.327	16.585	0.836	0.858	1.406
	2×2.56	0.908	0.392	22.849	0.800	0.772	1.916
МФВ	0	0.957	0.300	15.494	0.852	0.843	1.413
	2×2.56	0.945	0.235	17.225	0.850	0.484	1.944

В качестве дополнения приведем результаты аналогичного тестирования по другому исходному изображению. Используем фрагмент фото «Новгородский кремль» (<https://cvetamira.ru/art/image/1725>) рис. 7а. Модель радиоизображения со спектрально-локальной помехой – рис. 7б.



Рис. 7. Исходное аэрокосмическое изображение – а);
Модель радиоизображения со спектрально-локальной помехой – б).

Результаты реконструкций разными методами изображения рис. 7б с добавленным случайно-равномерным шумом (амплитудой 2.56 условных градаций яркостей) – рис. 8.

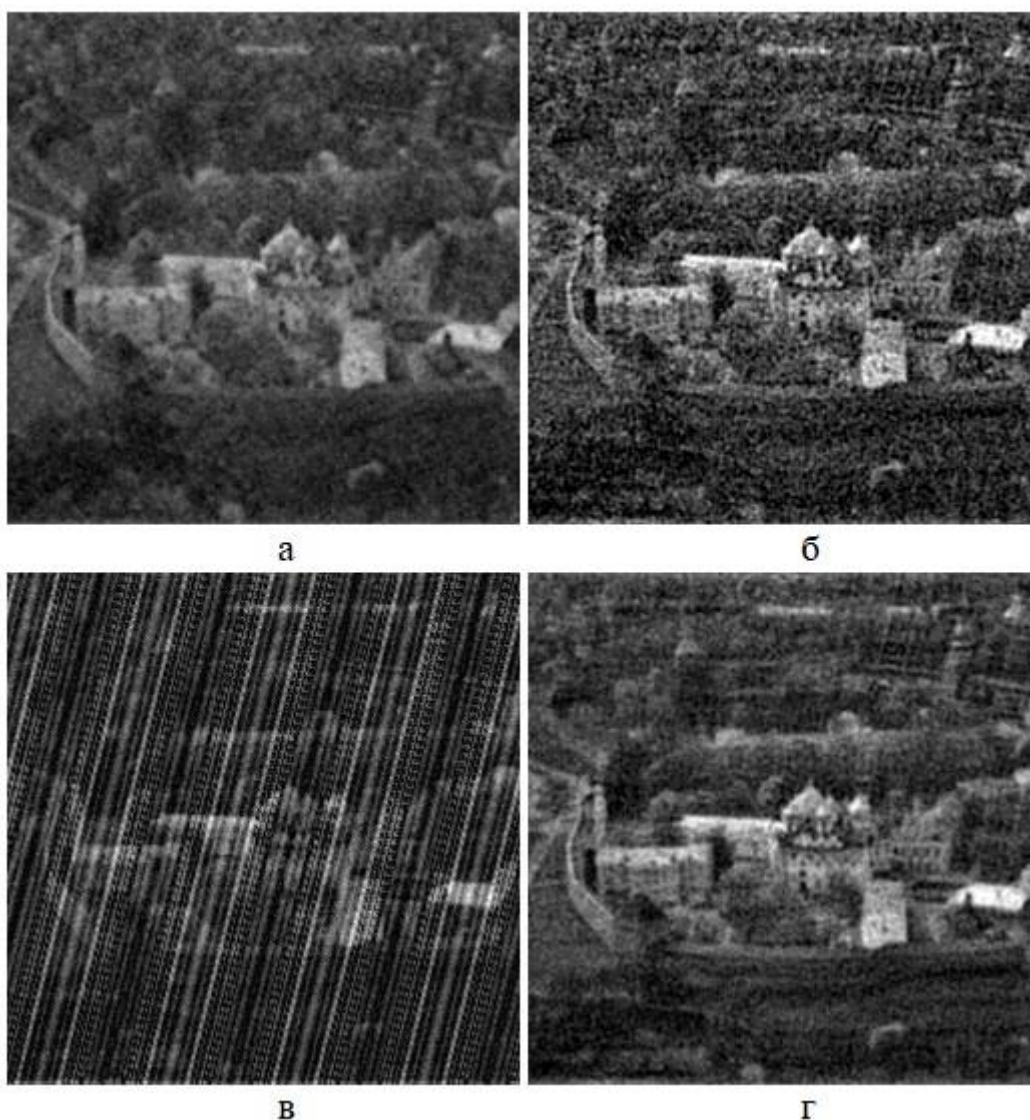


Рис. 8. Восстановление изображения рис. 7б (шум амплитудой 2.56) с помощью: МПО – а); АМОИ – б); ФВ – в); МФВ – г).

По объективным критериям (табл.1 и табл.2), видно, что по таким показателям как мера структурного подобия, средний контраст, СКО от «идеала» и мера гистограммного подобия лучшим является МФВ. Это подтверждает экспертную оценку. В то же время, мера спектрального подобия наиболее приближена к «идеалу» для МПО, а МФВ по этому показателю аутсайдер. Это обстоятельство находит объяснение на рис. 6. И для МФВ большее число гармоник, чем у других успешных методов (особенно при высоких уровнях шума и на высоких частотах), не попадает в уровни

ограничения сверху и снизу по амплитуде (выделено голубым цветом). Но в данной задаче, как выяснилось, это не главное. В пользу МПО и АМОИ здесь необходимо сказать, что в их работе не требуется знания каких-либо параметров шума, в то время как МФВ требуется подбор параметра соответствующего отношению шум/сигнал. Это и есть цена за преимущество по критериям качества. Что касается СКО разницы фазовых спектров восстановленного и «идеального» изображений, то для всех успешных методов они близки. Причем близки настолько, что статистически трудно различимы. Главное что все методы, перечисленные в табл. 1 и табл. 2, принципиально способны решать поставленную задачу.

Таблица 2. Объективные критерии (метрики) качества восстановленного разными методами тестового изображения «Новгород».

Изображение	Шум	Мера структурного подобия	Средний контраст	СКО от «идеала»	Мера гистограммного подобия	Мера спектрального подобия	СКО разницы фазовых спектров
«идеальное»	0	1	0.213	0	1	1	0
МПО	0	0.866	0.126	18.447	0.870	0.885	1.218
	2×2.56	0.824	0.152	21.125	0.878	0.864	1.837
АМОИ	0	0.911	0.334	17.100	0.951	0.791	1.193
	2×2.56	0.829	0.385	23.978	0.911	0.579	1.787
МФВ	0	0.921	0.306	15.953	0.957	0.772	1.201
	2×2.56	0.879	0.221	19.087	0.954	0.381	1.809

В качестве примера, на рис. 9 приведены изображения попиксельных разниц фазовых спектров (в радианах) для восстановленного с помощью МФВ изображения рис. 5г (шум амплитудой 2.56 условных градаций яркостей изображения) с фазовым спектром исходного «идеального» изображения рис. 1а.

Центр изображения (серая область) соответствует практически точному восстановлению спектра вблизи нулевой пространственной частоты (средней яркости) и на некотором расстоянии вокруг нее. Т.е. эта разность (ошибка) близка к нулю. Отклонения от серого цвета на рис. 9 означают наличие

разницы в фазовых спектрах восстановленного изображения и исходного «идеала» рис. 1а.

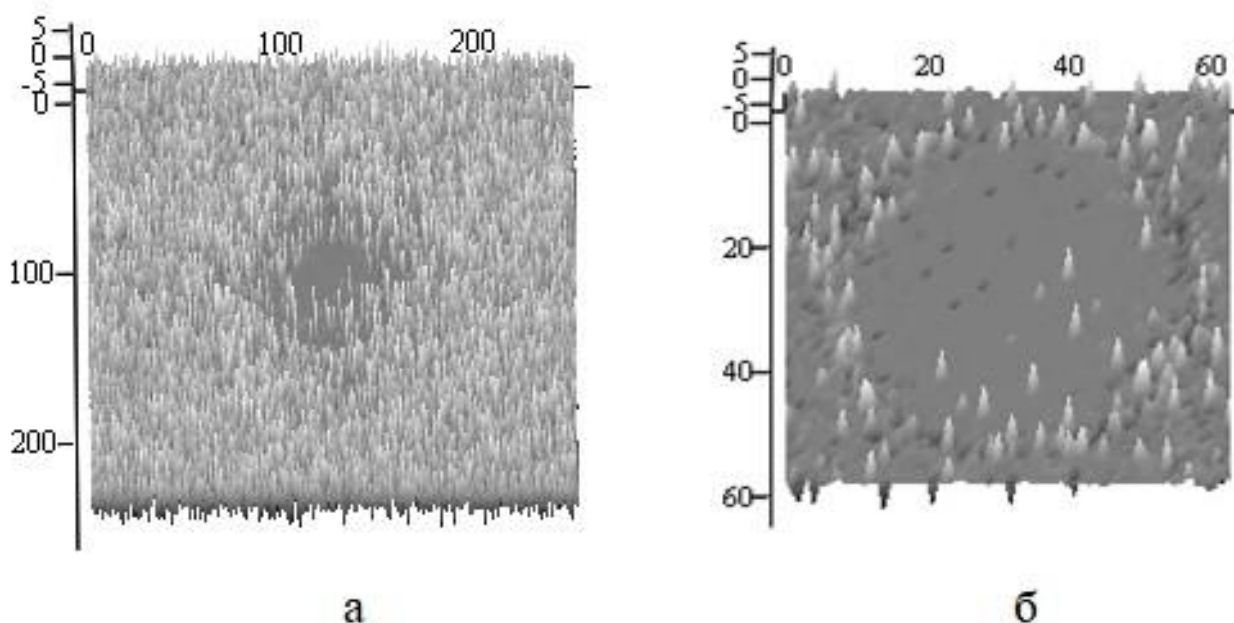


Рис. 9. Попиксельные разницы фазовых спектров восстановленного МФВ изображения рис. 5г (шум амплитудой 2.5б) с фазовым спектром исходного «идеального» изображения рис. 1а. По всему полю изображения – а); только центральная область рис. 9а (с наименьшим количеством ошибок) – б).

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ методов обработки цифровых изображений, способных в автоматическом режиме устранять спектрально-локальные помехи. В качестве конкурирующих методов выступают: метод перенормировки с ограничением, адаптивный метод опорного изображения и модификация фильтра Винера на основе метода опорного изображения. При одинаковых исходных условиях искажений (аппаратная функция (АФ) дефокусировки, спектрально-локальная помеха и наложение дополнительных аддитивных шумов), проверяется качество восстановления изображений. По экспертной оценке победителем в соревновании можно считать модифицированный фильтр Винера. Это подтверждается по таким объективным критериям как: мера структурного подобия, средний контраст, СКО от «идеала» и мера гистограммного подобия. Однако преимуществом МПО и АМОИ является то, что в их работе не требуется знания каких-либо

параметров шума, в то время как МФВ требуется подбор параметра соответствующего отношению шум/сигнал. Общим выводом является то, что все перечисленные методы принципиально способны решать задачи борьбы со спектрально-локальными помехами.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Gonzalez R.C., Woods R.E., Digital Image Processing. NJ. Prentice Hall, International Version 3rd Edition. 2012. 1071p.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. – Методы решения некорректных задач. М.Наука, 1979.
3. Зражевский А. Ю. и др. Повышение качества радиоизображений // Нелинейный мир. – 2010. – №. 9. – С. 582-590.
4. Гуляев Ю.В. и др. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 1. Классический метод опорного изображения (МОИ) // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – №. 12.
5. Гуляев Ю.В. и др. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 2. Адаптивный метод опорного изображения (АМОИ). // Журнал радиоэлектроники – 2013. – №. 12.
6. Гуляев Ю.В. и др. Коррекция пространственного спектра, искаженного оптической системой, с помощью метода опорного изображения. Часть 3. Универсальный опорный спектр. // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – №. 12.

7. Кокошкин А.В. и др. Использование метода перенормировки с ограничением для восстановления искаженных изображений при наличии помех и шума с неизвестными параметрами. // Журнал радиоэлектроники – 2015. – № 7.
8. Кокошкин А.В., Новичихин Е.П. Модификация фильтра Винера на основе метода опорного изображения. // Журнал радиоэлектроники. 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.10>
9. Кокошкин А.В. и др. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №. 6.
10. Кокошкин А.В. Оценка спектрального подобия цифровых изображений // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.4>
11. Кокошкин А.В. Методы интерполяции разреженных изображений, работающие в частотной области // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.3.10>
12. Кокошкин А.В., Новичихин Е.П. Оценка качества изображений, полученных дистанционным зондированием // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2023. – Т. 15. – №. 3. – С. 327-334. <https://doi.org/10.17725/rensit.2023.15.327>

Для цитирования:

Кокошкин А.В. Сравнительный анализ эффективности методов борьбы со спектрально-локальными помехами. // Журнал радиоэлектроники. 2024. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.11.4>